



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO  
CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICA E DA NATUREZA  
INSTITUTO DE FÍSICA  
LICENCIATURA EM FÍSICA

**COSMOLOGIA  
PARA O ENSINO MÉDIO**

Trabalho Final do Curso de Licenciatura em Física

Clara Tereza dos Santos Lima

Orientadora: Wilma Machado Soares dos Santos

Co-orientadora: Penha Maria Cardozo Dias

Maio 2002



*Qualquer criatura dotada de inteligência, com capacidade de auto-conhecimento, com habilidade para examinar o processo de pensamento e com espantosa consciência da inevitabilidade da morte poderia, naturalmente, estar propenso a fazer perguntas fundamentais acerca do mundo que o rodeia. Existe uma compulsão para sentir que a existência tem um propósito e que o universo faz sentido. Esses fatores motivantes são a verdadeira fonte da variedade das atividades humanas que vão da religião à Astronomia. Não é, portanto, surpreendente, que todas as civilizações que surgiram sobre a Terra tenham tido a Cosmologia na essência de suas doutrinas\*.*

*William J. Kaufmann III*

\*Tradução: Clara Tereza S. Lima

# Agradecimentos

*Agradeço ao meu marido Clemar e aos meus filhos Luciane e Leandro por compreenderem o quanto é importante para mim a busca do conhecimento e aceitarem a minha ausência, em alguns momentos de suas vidas, por estar envolvida com meus próprios caminhos.*

*A meus pais, por me ensinarem a ultrapassar com dignidade e determinação as dificuldades da vida, não me deixando desistir de realizar os meus sonhos.*

*Às minhas orientadoras Wilma Machado Soares dos Santos e Penha Maria Cardozo Dias, cujos ensinamentos, dedicação, incentivo e orientação foram fundamentais para a realização deste trabalho.*

*Agradeço, especialmente, ao Professor Ioav Waga, do Departamento de Matemática da UFRJ que me guiou pelos caminhos da Cosmologia.*

*Aos professores do Curso de Licenciatura em Física, por nos transmitirem seus conhecimentos e experiências profissionais.*

*Ao professor Francisco Arthur Braun Chaves, coordenador do Curso de Licenciatura em Física, cuja dedicação e desempenho tem possibilitado o crescimento do curso na universidade.*

*Ao professor Alfredo Sotto do Colégio Pedro II que, durante o estágio, procurou nos transmitir a melhor forma de relacionarmos com os nossos alunos no exercício da nossa profissão.*

*E, finalmente, ao Instituto de Física, por ter me dado a oportunidade de ingressar nesta universidade e concluir o meu curso.*

# SUMÁRIO

<b>Introdução.....</b>	<b>06</b>
<b>Capítulo I – Metodologia .....</b>	<b>09</b>
I.1 – Teoria da Aprendizagem Significativa de Ausubel e Historia daFísica .....	10
I.2 – Conhecimentos Prévios.....	13
I.3 – Análise dos Questionários.....	17
<b>Capítulo II – O Mundo Feito de Partículas.....</b>	<b>20</b>
II. 1 – A Idéia de ‘Partícula’.....	21
II. 2 – Eletricidade.....	23
II. 3 – Os Raios Catódicos.....	24
II. 4 – A Descoberta do Elétron.....	26
II. 5 – O Átomo de Thomson .....	28
II. 6 – Os Raios-X.....	29
II. 7 – Descoberta da Radioatividade.....	30
II. 8 – Descoberta do Núcleo Atômico e do Próton.....	32
II. 9 – O Nêutron .....	37
II. 10 – Fissão Nuclear e Fusão Nuclear.....	38
II. 11 – A Energia Quantizada.....	42
II. 12 – O Átomo de Bohr.....	43
II. 13 – Novas Partículas.....	44
II. 14 – Partículas Subnucleares e o Átomo.....	46
II. 15 – A Estrutura do Átomo da Mecânica Quântica.....	48
<b>Capítulo III – A Formação da Moderna Ciência da Cosmologia.....</b>	<b>50</b>
III. 1 – Introdução.....	51
III. 2 – Debate Curtis x Shapley.....	51
III. 3 – A Lei de Hubble.....	53
III. 4 – Modelos de Universo.....	55
III. 5 – Teoria do Big-Bang.....	57

III. 5.1 – Origem do Universo.....	57
III. 5.2 – Evolução do Universo.....	58
III. 5.2.a – Era da Radiação.....	58
III. 5.2.b – Era da Matéria.....	60
<b>Conclusão.....</b>	<b>64</b>
<b>Apêndice .....</b>	<b>65</b>
A. 1 – Método de Thomson para determinação da velocidade e da massa/carga dos raios catódicos na Ampola de Crookies .....	66
A. 2 – O espectro eletromagnético.....	69
A. 3 – O que é radioatividade.....	74
A. 4 – Câmara de Wilson.....	75
A. 5 – Nebulosas Espirais.....	76
A. 6 – Variáveis Cefeidas.....	77
A. 7 – Unidades de distâncias mais usadas em Astronomia e .....Cosmologia.	78
A. 8 – Efeito Doppler.....	81

## INTRODUÇÃO

Este trabalho propõe uma forma de ensinar tópicos de Física relacionados à Cosmologia de uma maneira acessível a estudantes do curso de formação de professores – Licenciatura em Física, a professores do Ensino Médio que não estudaram esses temas em seus cursos universitários e a alunos de Ensino Médio. A importância deste trabalho está em oferecer ferramentas aos professores do Ensino Médio para o esclarecer a aprendizagem escolar de assuntos que seus alunos tomam contato através da mídia.

Um método de ensinar a origem e a evolução do Universo recorrendo à História da Física como reveladora das questões que levaram ao desenvolvimento do tema é descrito de forma bastante detalhada.

Como já relatado de forma muito apropriada por Fernanda Ostermann [1,p.13], é absolutamente necessário proporcionar aos alunos do Ensino Médio uma visão mais atualizada do mundo. Com esse objetivo, iniciei minha pesquisa nas disciplinas de Instrumentação para o Ensino de Física e Física Moderna II, no curso de Licenciatura do Instituto de Física da UFRJ. A escolha do tema de pesquisa foi motivada pela dificuldade que nós, estudantes dessas disciplinas, tivemos em responder perguntas relacionadas ao tema, quando questionados por professores. Ficou evidente que tínhamos muito pouco conhecimento do assunto e que teríamos dificuldade para ensinar tópicos tão complexos, de forma acessível para nossos alunos do Ensino Médio. Além disso, no colégio Sistema MV1, unidade Méier, foi constatada dificuldade por parte dos professores para o ensino desses tópicos, na disciplina Ciência do Homem e da Vida, que os alunos desse colégio cursam na 1<sup>a</sup> série do Ensino Médio.

Por outro lado, os Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio (PCNs) – Física [2, p.209], recomendam:

[...] As modalidades exclusivamente pré-universitárias e exclusivamente profissionalizantes do Ensino Médio precisam ser superadas, de forma a garantir a pretendida universalidade desse nível de ensino, que igualmente complete quem encerre no Ensino Médio sua formação escolar e quem se dirige a outras etapas de escolarização. Para o Ensino Médio meramente propedêutico atual, disciplinas científicas, como a Física, têm omitido os desenvolvimentos realizados durante o século XX e tratam de maneira enciclopédica e excessivamente dedutiva os conteúdos tradicionais.

[...] Trata-se, isso sim, de se prover os alunos de condições para desenvolver uma visão de mundo atualizada, o que inclui uma compreensão mínima das técnicas e dos princípios científicos em que se baseiam.

Em relação ao nosso tema específico os PCNs indicam que [ps.212 e 230]:

[...] A cosmologia, no sentido amplo de visão de mundo, e inúmeras tecnologias contemporâneas, são diretamente associadas ao conhecimento físico...

[...] Uma Física que discuta a origem do universo e sua evolução.

Com relação ao desenvolvimento cognitivo, é proposto [p. 231]:

[...] Sendo o Ensino Médio um momento particular do desenvolvimento cognitivo dos jovens, o aprendizado de Física tem características específicas que podem favorecer uma construção rica em abstrações e generalizações, tanto de sentido prático como conceitual. Levando-se em conta o momento de transformações em que vivemos, promover a autonomia para aprender deve ser preocupação central, já que o saber de futuras profissões pode ainda estar em gestação, devendo buscar-se competências que possibilitem a independência de ação e aprendizagem futura.

Tendo em vista as dificuldades relatadas e as recomendações do PCNs, realizei pesquisas para verificar o nível de conhecimento ou “desconhecimen-

to” de alunos da 1<sup>a</sup> à 3<sup>a</sup> séries em relação aos tópicos de Física, necessários à compreensão dos conceitos básicos da Cosmologia: No Colégio Pedro II, unidade Tijuca e no Colégio José da Fonseca da rede particular. Para tal verificação, apliquei questionários para levantar os conhecimentos prévios dos alunos, de acordo com a Teoria da Aprendizagem Significativa de Ausubel [3].

A partir da análise dos resultados dos questionários, introduzi, em nossa pesquisa, o uso da História e Evolução da Física como organizador, para estabelecer a relação entre os conhecimentos prévios e os conceitos a serem aprendidos de “forma significativa”. Seguindo a linha recomendada em [4], que é devotada ao ensino de partículas elementares para o Ensino Médio, elaborei um texto e *slide* de animação no *software power point* que, espero, contribuam bastante para elucidar, um tema tão complexo como a Cosmologia, em uma linguagem acessível aos alunos do Ensino Médio.

O plano de trabalho é o seguinte:

No capítulo I, apresento, de forma sucinta, os principais conceitos da Teoria da Aprendizagem Significativa de Ausubel; o questionário sobre conhecimentos prévios que apliquei aos alunos e a análise de suas respostas.

O capítulo II é dedicado à história dos conceitos físicos relacionados à Cosmologia.

No capítulo III, desenvolvo a teoria, em si, do trabalho, a Cosmologia.

No capítulo IV, encontram-se as conclusões do trabalho.

# **Capítulo I**

# **Metodologia**

*“A mente do aluno não é um vaso que se deve encher, mas uma lareira que se deve acender”.*

*Plutarco*

## **I. 1 – Teoria da Aprendizagem Significativa de Ausubel e História da Física**

Essa teoria foi desenvolvida pelo psicólogo americano David Ausubel na década de 60. Ela pretende explicar o processo ensino-aprendizagem a partir de uma perspectiva cognitiva, significando isso, “[...] entender a aprendizagem como um processo de modificação do conhecimento, em vez de comportamento em um sentido externo e observável, e reconhecer a importância que os processos mentais têm nesse desenvolvimento”. Uma outra característica marcante das idéias de Ausubel é o fato de “[...] basearam-se em uma reflexão específica sobre a aprendizagem escolar e o ensino, em vez de tentar somente generalizar e transferir à aprendizagem escolar conceitos ou princípios explicativos extraídos de outras situações ou contextos de aprendizagem” [3, p.231].

[...] A importância da estrutura cognitiva prévia e a sua conscientização pelo ensino evidência, claramente, o que talvez seja a afirmação mais conhecida entre a formulações de Ausubel: “o fator mais importante que influí na aprendizagem é aquilo que o aluno já sabe. Descubram o que é e o ensinem em seqüência [3, p.236].

A “aprendizagem significativa” é o conceito mais importante na Teoria de Ausubel. Por aprendizagem significativa entende-se um processo de interação entre uma nova informação com alguma informação relevante, pré-existente na estrutura cognitiva do aprendiz; essa interação possibilita que a nova informação adquira significado. Ausubel chama essa estrutura cognitiva pré-existente de “conceitos subsunidores” ou, somente, “subsunidores” [5, p.7].

A aprendizagem significativa depende, pois, do quanto a nova informação for “substanciada” pelos conhecimentos prévios do aprendiz [3, p.233];

contrariamente, quando não houver tal embasamento, a aprendizagem é mecânica ou repetitiva. Logo: [3, p. 233]

[...] Efetivamente, a aprendizagem significativa tem vantagens notáveis, tanto do ponto de vista do enriquecimento da estrutura cognitiva do aluno como do ponto de vista da lembrança posterior e a utilização para experimentar novas aprendizagens, fatores que a delimitam como da aprendizagem mais adequada para ser promovida entre os alunos.

A aprendizagem significativa apresenta três vantagens essenciais em relação a aprendizagem memorística ou mecânica ou repetitiva [3, p.233]:

- 1<sup>a</sup> - o conhecimento adquirido de forma significativa é retido e lembrado por mais tempo;
- 2<sup>a</sup> - aumenta a capacidade de aprender novos conhecimentos ou conteúdos relacionados ao conhecimento original de uma maneira mais fácil, mesmo que o conhecimento original seja esquecido;
- 3<sup>a</sup> - a aprendizagem significativa facilita a reaprendizagem de uma informação esquecida.

Em resumo, três noções básicas caracterizam o processo de aprendizagem significativa [3, p.234]:

- 1) **Conceito inclusor ou conceitos inclusores** – são os conceitos ou idéias presentes, previamente, na estrutura cognitiva do aprendiz, e que servirá de ponto de localização para as novas idéias ou conceitos que se pretende ensinar.
- 2) **Inclusão obliteradora** – é o processo de interação entre aquilo que se quer ensinar e os conceitos inclusores;

**3) Assimilação** – o resultado dos processos de inclusão obliteradora é uma autêntica assimilação entre os velhos significados e os novos, o que implica uma estrutura mais rica e diferenciada que a original.

Na aplicação do método de aprendizagem significativa, a História da Física será usada como instrumento para absorção de nova informação. A História é qualificada para essa tarefa, na medida em que mostra questões que foram, na vida real, relevantes à alguma descoberta, ou à formulação de algum conceito; ao clarificar idéias e conceitos, ela é parte inseparável dos fundamentos da Física. Nesse uso, a História da Física é muito mais que mero entendimento da Física [2, p.235] “[...] percebida enquanto construção histórica, como atividade social humana [...]”.

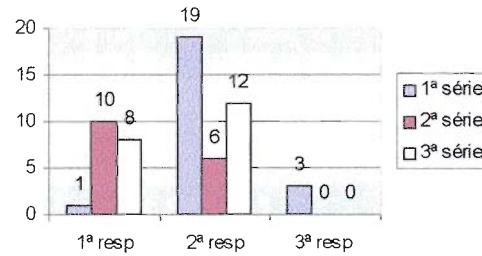
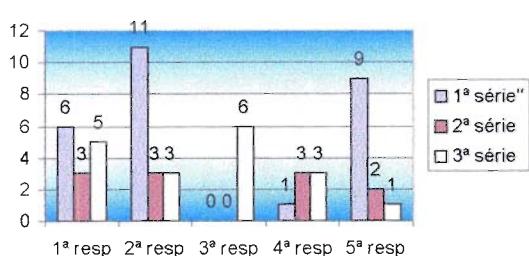
## I. 2 – Conhecimentos Prévios

Com objetivo de verificar os conceitos prévios relacionados ao tema desse trabalho, apliquei um questionário com sete questões a 115 alunos do Ensino Médio, sendo: 56 alunos do Colégio Pedro II (unidade Tijuca), da rede pública e 59 alunos do Colégio José Fonseca, da rede particular. No primeiro colégio, do total de 56 alunos, 27 estavam cursando a 1<sup>a</sup> série, 11, a 2<sup>a</sup> e 18, a 3<sup>a</sup>. No segundo, do total de 59 alunos, 23 cursavam a 1<sup>a</sup> série, 16, a 2<sup>a</sup> e 20, a 3<sup>a</sup>. As respostas servem como um guia, na identificação de conceitos que necessitam ser entendidos pelo aprendiz.

As perguntas foram elaboradas, tendo em vista que muito da terminologia da Física Moderna é usada em desenhos animados, filmes, literatura de ficção científica, etc, enfim, pelos meios de comunicação e divertimento. Assim, o aprendiz, de certa forma, pode ter uma concepção de conceitos tais como matéria, átomo, fissão e fusão nuclear, quarks, mésons, neutrinos, estrelas, universo, etc.

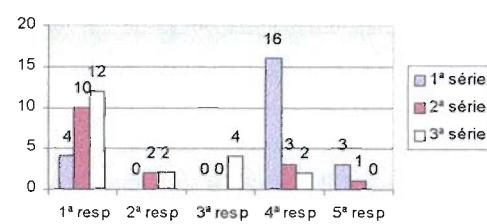
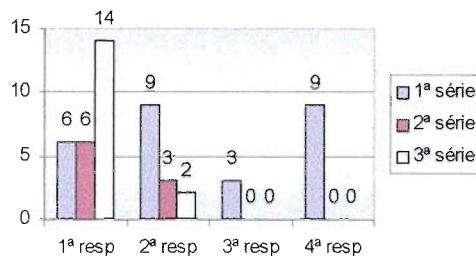
### 1 – O que é matéria?

Colégio Pedro II	1 <sup>a</sup> série	2 <sup>a</sup> série	3 <sup>a</sup> série
definiram como tudo que ocupa lugar no espaço	6	3	5
definiram como tudo que possui massa	11	3	3
definiram como tudo que ocupa lugar no espaço e tem massa	0	0	6
associaram a quantidade átomos, moléculas, energia do corpo	1	3	3
não associaram a nada	9	2	1
Colégio José Fonseca	1 <sup>a</sup> série	2 <sup>a</sup> série	3 <sup>a</sup> série
definiram como tudo que ocupa lugar no espaço	1	10	8
definiram como tudo que ocupa lugar no espaço e tem massa	19	6	12
não associaram a nada	3	0	0



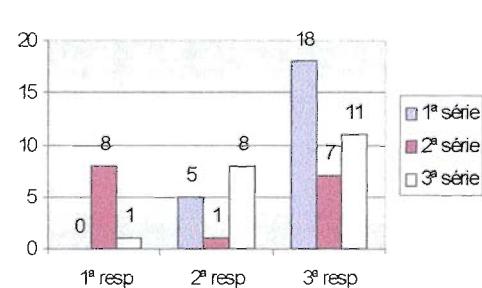
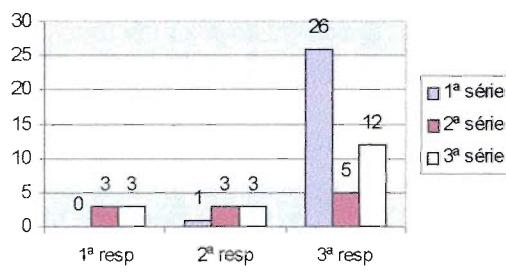
## 2- De que é formado o átomo?

Colégio Pedro II	1ª série	2ª série	3ª série
por prótons, elétrons e nêutrons	6	6	14
por moléculas	9	3	2
por células, ou por gás, ou por substâncias	3	0	0
responderam que não sabiam	9	0	0
Colégio José Fonseca	1ª série	2ª série	3ª série
por prótons, elétrons e nêutrons	4	10	12
por moléculas	0	2	2
por partículas infinitamente pequenas	0	0	4
só por prótons, ou só nêutrons ou só prótons e nêutrons	16	3	2
responderam que não sabiam	3	1	0



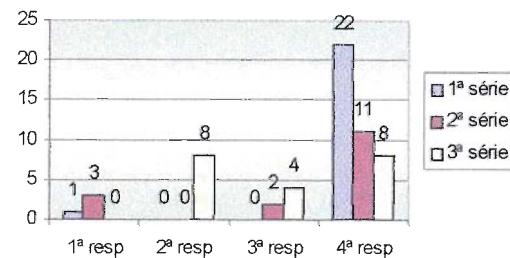
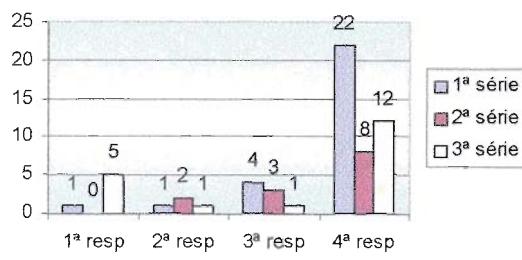
## 3- O que é fissão nuclear? E fusão nuclear?

Colégio Pedro II	1ª série	2ª série	3ª série
definiram corretamente só fusão	0	3	3
definiram corretamente fissão e fusão	1	3	3
não associaram a nada	26	5	12
Colégio José Fonseca	1ª série	2ª série	3ª série
definiram corretamente fissão e fusão	0	8	1
associaram a explosão, bomba nuclear, composição química	5	1	8
não associaram a nada	18	7	11



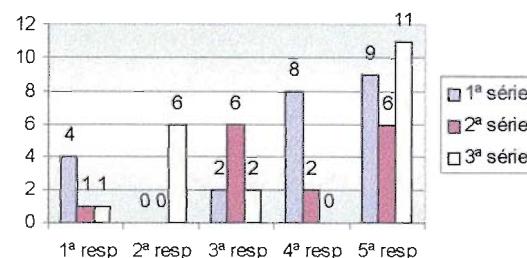
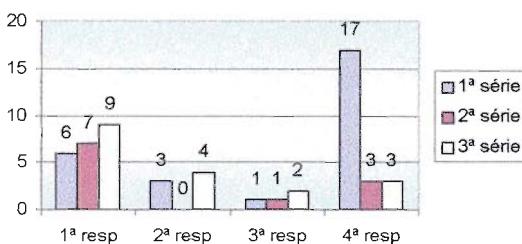
## 4 – O que são quarks, mésons e neutrinos?

Colégio Pedro II	1ª série	2ª série	3ª série
são partículas de um átomo	1	0	5
são átomos	1	2	1
são substâncias, matéria, materiais radioativos, etc.	4	3	1
não sabiam responder	22	8	12
Colégio José Fonseca	1ª série	2ª série	3ª série
são prótons, elétrons e nêutrons	1	3	0
são partículas menores que o átomo	0	0	8
são, combinação química, ou cargas do núcleo	0	2	4
não sabiam responder	22	11	8



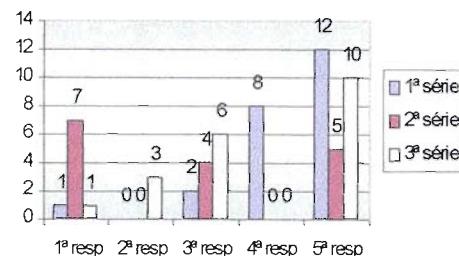
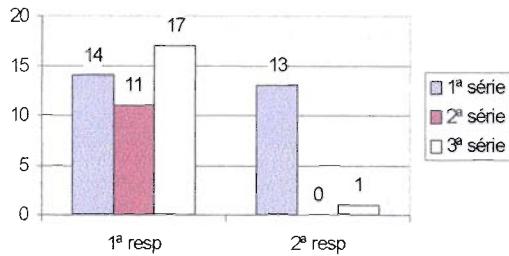
## 5 – Que tipo de reação ocorre no interior do sol?

Colégio Pedro II	1ª série	2ª série	3ª série
responderam explosão, incandescência, reação solar ou cadeia	6	7	9
responderam reação química, ou combustão	3	0	4
responderam reação ou fusão nuclear	1	1	2
não sabiam responder	17	3	3
Colégio José Fonseca	1ª série	2ª série	3ª série
responderam transformação de H em He (fusão nuclear)	4	1	1
responderam explosão de gases, de micromoléculas*, de forças	0	1*	6
responderam reação química, combustão, gasosa, lava, etc.	2	6	2
responderam radiação cósmica	8	2	0
não sabiam responder	9	6	11



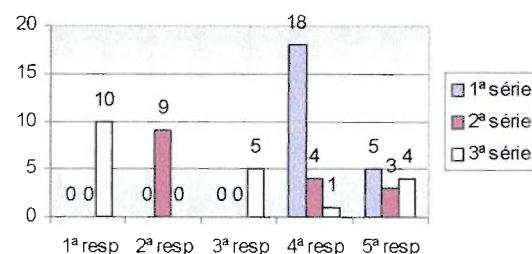
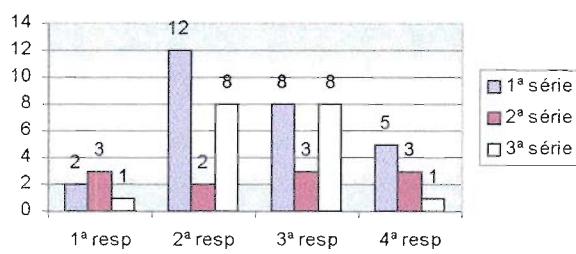
## 6 – Qual a temperatura da superfície do Sol?

Colégio Pedro II	1ª série	2ª série	3ª série
estimaram entre dezenas e bilhões de graus centígrados	14	11	17
não fizeram nenhuma estimativa	13	0	1
Colégio José Fonseca	1ª série	2ª série	3ª série
estimaram entre dezenas e bilhões de graus centígrados	1	7	1
estimaram tão alta que produz explosões e redemoinho de fogo	0	0	3
estimaram em incalculável ou não podemos precisar	2	4	6
estimaram entre 5500° C à 6000° C	8	0	0
não fizeram nenhuma estimativa	12	5	10



## 7 – Como o universo se formou?

Colégio Pedro II	1ª série	2ª série	3ª série
associaram a átomos, choques, mistura de substâncias, reflexão	2	3	1
associaram a uma criação divina	12	2	8
associaram a uma grande explosão chamada Big-Bang	8	3	8
não associaram a nada	5	3	1
Colégio José Fonseca	1ª série	2ª série	3ª série
Associaram a fusão de átomos,	0	0	10
Associaram a explosões ou choques de átomos, astros, etc.	0	9	0
Associaram a outras causas (reação química, bola de fogo, divina)	0	0	5
Associaram a uma explosão chamada Big-Bang	18	4	1
Não associaram a nada	5	3	4



## I. 3 – Análise dos Resultados

Como já foi informado, o total de alunos investigados foi de 115, sendo 56 alunos do colégio Pedro II e 59 do colégio José da Fonseca. Verifiquei que as respostas nos dois grupos foram semelhantes, porém, com percentuais diferentes. Isso me conduziu a uma análise individual dos grupos. Chamei amostra I ou grupo I os alunos do Pedro II e amostra II ou grupo II os alunos do José da Fonseca. Considerei, separadamente, respostas erradas e imprecisas, daquelas que os alunos escreveram não saber responder.

### Questão 1:

A definição de matéria é um tópico presente no programa do Ensino Médio. Assim, 66% da amostra I e 95% da amostra II, definiram matéria, de acordo com aquela que consta na maioria dos livros de Física e Química do Ensino Médio, sendo essa mesma definição, geralmente, à ensinada pelo professor na sala de aula. Não souberam responder, 21,5% do grupo I e 5% do grupo II. Entretanto, 12,5% dos alunos do grupo I relacionaram de uma certa forma, matéria à aglomeração de partículas.

### Questões 2 :

Escreveram a resposta esperada para a questão 2 – o átomo é constituído por prótons, elétrons e nêutrons – 50% da amostra I e 44% da amostra II. Responderam de forma imprecisa ou totalmente incorreta 34% do grupo I e 49% do grupo II. Afirmaram não saber responder à pergunta, 16 % da amostra I e da amostra II. Como, a constituição do átomo é ensinada no 1º semestre da 1<sup>a</sup> série do Ensino Médio e o questionário foi aplicado, nessas escolas, no 2º semestre, entendi que, aproximadamente, metade dos alunos nas duas amostras não assimilou de forma significativa, o que lhes foi ensinado.

### **Questão 3:**

76,8% da amostra I e 61,1% da amostra II não souberam responder a questão. Definiram corretamente fissão e fusão nuclear, 12,5% do grupo I e 15,2% da amostra II. Porém, 23,7% dos alunos da amostra II relacionaram esses processos nucleares a uma explosão ou a bomba nuclear ou a uma reação química. O lançamento de bombas atômicas em Hiroshima e Nagasaki, durante a II guerra mundial, além de ser abordado no Ensino Fundamental e no Ensino Médio é, freqüentemente, divulgado pela mídia, em documentários, filmes e seriados. Em virtude alto percentual de alunos que escreveram não saber responder a questão, sugiro que, durante abordagem desse fato histórico, na escola, professores de Física e Química façam seminários explicando aos alunos os processos nucleares envolvidos, durante a detonação dessas armas nucleares.

### **Questão 4:**

Verifiquei que 75% dos alunos do Pedro II e 69,5% dos alunos do José da Fonseca escreveram que não sabiam responder à questão 4. Alguns deles afirmaram não conhecer as palavras quarks, mésons e neutrinos. 25% do grupo I e 30,5% do grupo II entendem que quarks, mésons e neutrinos são átomos; ou partículas de um átomo; ou são denominações de alguma substância ou reação química. Esse resultado era o esperado. Essas estruturas são dificilmente citadas nos livros de Ensino Médio ou na mídia, aparecendo, só esporadicamente, em revistas populares de divulgação científica.

### **Questão 5:**

Não souberam responder à 5<sup>a</sup> pergunta, 41% da amostra I e 44% da amostra II. Apenas 7% dos alunos do Pedro II e cerca de 10% dos alunos do José da Fonseca escreveram que a fusão nuclear é o processo que ocorre no interior do Sol. Os demais integrantes das duas amostras associaram o tipo de

reação que ocorre na região central do Sol com os tipos de reações mais relacionados com o seu cotidiano, ou seja, combustão, reação química, explosão gasosa, etc. Podemos concluir que alguns alunos, de uma certa forma fazem uma analogia com o fenômeno citado, embora não saibam fazer distinção entre eles. Comparando esses resultados com aqueles da questão 3, parece-me que a justificativa do alto percentual naquela questão seja o desconhecimento do nome dos processos.

### **Questão 6:**

75% dos alunos do grupo I e 40 % dos alunos do grupo II sabem que a temperatura superficial do Sol é muito alta, porém não conhecem o valor. 25% da amostra I e 46% da amostra II não souberam responder à pergunta. Somente 14% dos alunos do José da Fonseca responderam que a temperatura do Sol está entre 5500°C e 6000°C.

### **Questão 7:**

16% da amostra I e 20% da amostra II responderam que não sabem nada sobre a formação do universo. 40% dos alunos do grupo I relacionaram a origem do universo à criação divina; 40%, a uma grande explosão chamada Big-Bang e 4% associaram a outras causas. Na amostra II, 39% escreveram que o universo começou a partir de uma grande explosão chamada Big-Bang. Desses, 78% eram alunos da 1<sup>a</sup> série. Os demais integrantes desse grupo associaram a criação do universo a outros fenômenos.

Algumas das respostas colocadas pelos alunos evidenciaram, de certa forma, uma tentativa em conciliar a gênese explicada pelas suas religiões com aquela da Ciência.

## Capítulo II

# O Mundo Feito de Partículas

*O estudo da História da Ciência é muito importante, sobretudo para os jovens. Acho que os jovens deveriam ler História da Ciência porque freqüentemente o ensino universitário é extremamente dogmático, não mostrando como ela nasceu.*

*Mário Schenberg, Pensando a Física.*

## II. 1 – A Idéia de ‘Partícula’

A Cosmologia, como entendida hoje, é a ciência que estuda a origem e a evolução do universo. Ela lida com a formação de estruturas “muito grandes”, entendendo-se por isso, galáxias, grupos de galáxias, aglomerados e superaglomerados de galáxias, etc. Na outra ponta da escala, o universo é constituído de partículas que se aglomeraram, formando a matéria do mundo, inclusive a estudada pela Cosmologia. Essas partículas básicas da matéria surgiram como produto da criação e evolução do universo e sua existência deve ser, pois, justificada no contexto da Cosmologia.

Mas a visão de uma natureza particulada nem sempre existiu. A descoberta das partículas que compõem o universo deu-se em uma linha de pesquisa independente da pesquisa em Cosmologia. Além disso, a concepção de um universo formado por aglomeração de partículas pequenas, apesar de proposta na Antigüidade, foi controversa durante quase toda a história do pensamento; só a partir da segunda metade do século XIX e princípio do século XX, ela foi, integralmente, aceita no pensamento científico.

Na Antigüidade Helênica e na tradição greco-romana, na Idade Média, a Terra ocupava o centro do universo e, em torno dela, giravam, em ordem crescente do raio da órbita, Lua, Mercúrio, Vênus, Sol, Marte, Júpiter, Saturno e, finalmente, a esfera das estrelas fixas. Esse universo era fechado e, nele, o movimento circular era preferencial, representando a perfeição.

A idéia de uma partícula última, (o átomo) a partir da qual todo o universo seria criado, data de Leucipo e Demócrito, que viveram entre o século IV e V a.C. Essas partículas se moviam em um vácuo e se aproximavam, formando aglomerados. Mas essa idéia chocou o pensamento grego, principalmente por pressupor a existência do vácuo: Para eles, o que existe é a matéria; o vácuo, por representar o nada, não poderia existir. Os gregos longínquos só poderiam admitir o átomo, se pudessem conceber modos diferentes de

“ser”. Cerca de um milênio depois, no século XVII, René Descartes resolveu o problema, propondo uma matéria infinitamente divisível, mas compactada de tal forma, que não existissem vazios entre partículas. Gottfried Wilhelm Leibniz também não aceitou o vácuo e o átomo; para ele, a existência de uma partícula ultima da qual o mundo fosse feito, colocaria o problema de ter de justificar essa própria partícula; ora, esse último problema, nada mais é que o problema inicial de justificar a matéria, colocado em outro contexto do lugar; o mundo deve ser, pois, um contínuo, conclui Leibniz.

Somente no século XIX, a Teoria do Calor veio a abraçar o conceito de átomo, antes mesmo que sua existência fosse consensualmente admitida pelos físicos. É possível que os sucessos dessa teoria tenham motivado a levar a sério a idéia de um mundo particulado. Uma grande motivação veio com John Dalton.

Dalton buscava uma teoria que pudesse explicar a lei de Lavoisier ou lei de conservação da massa – *numa reação química a soma das massas dos reagentes é igual à soma das massas dos produtos da reação* – e a lei de Proust ou lei das proporções definidas – *uma substância, contém, sempre, os mesmos elementos combinados, cujas massas conservam a mesma proporção*; – essas leis descrevem regularidades observadas nas transformações químicas, mas não as explicam. Então, Dalton postulou:

- a) toda matéria é composta por partícula fundamental, denominada átomo.
- b) os átomos são permanentes, indivisíveis, e não podem ser criados nem destruídos.
- c) os diferentes elementos químicos possuem diferentes propriedades, porque seus átomos são diferentes.

O estabelecimento final da existência de uma natureza particulada, bem como a descoberta da estrutura interna do átomo deu-se ao longo do século

XX, em várias etapas e em linhas de pesquisa, muitas vezes independentes. Precisou-se da descoberta do elétron e do próton e do nêutron; do estudo separado da radiação ionizante; finalmente, a descoberta do chamado raio cósmico levou à descoberta de reações simultâneas no núcleo do átomo e de partículas cujas existências eram inimagináveis, as chamadas partículas estranhas. Nascia a Física de Partículas.

## II. 2 – Eletricidade

As primeiras descobertas relacionadas aos fenômenos elétricos, de que se tem notícia devem-se aos gregos. Thales de Mileto, no século VI a.C. observa que um pedaço de âmbar, depois de friccionado com uma pele de animal, adquire a propriedade de atrair pedacinhos de palha, grãos de semente e outros objetos leves. William Gilbert, no século XVI, descobre que substâncias como vidro, parafina, enxofre e outros apresentam propriedades semelhantes. Stephen Gray descobre a condução elétrica e, em 1733, Charles-François Du Fay, após experimentos, conclui que “existem duas espécies de eletricidade” [8, p.14]. Abbé Nollet interpreta as duas espécies de eletricidade de Du Fay como diferentes tipos de fluido elétrico. Benjamin Franklin propõe que a eletricidade consiste de uma única espécie de fluido, formado por partículas extremamente sutis. Introduz, ainda, a idéia de transferência de eletricidade de um corpo para outro: De acordo com Franklin, quando dois corpos são atritados, um fica com deficiência de eletricidade, enquanto o outro fica com excesso. Chamou a deficiência de elétrons de “eletricidade negativa” e o excesso, de “eletricidade positiva”. Denominou de carga do corpo a quantidade de eletricidade (positiva ou negativa), contida em qualquer corpo.

Porém, a resposta da questão da natureza da eletricidade precisou aguardar a descoberta do elétron.

## II. 3 – Os Raios Catódicos

Um problema de investigação, em moda no final do século do XIX, era investigar o que acontece, quando uma corrente elétrica flui através de qualquer tipo de substância, principalmente, fenômenos que ocorrem em descargas elétricas, através de gases rarefeitos, em tubos de vidro. Esses experimentos levaram à descoberta de novo fenômeno.

Francis Hausbee, Nollet, Gottfried Grummont observam o surgimento de uma estranha luz, no interior de vasilhas de vidro (figura 1), quando elas são ligadas a uma fonte de eletricidade, de alta tensão e o ar no interior do vasilhame é retirado até sua pressão atingir um valor baixo (1/60 da pressão normal). Um avanço tecnológico que permitiu melhorar o vácuo no tubo, foi a bomba de vácuo de John Heinrich Geissler; (cerca de 10 milésimos da pressão atmosférica).

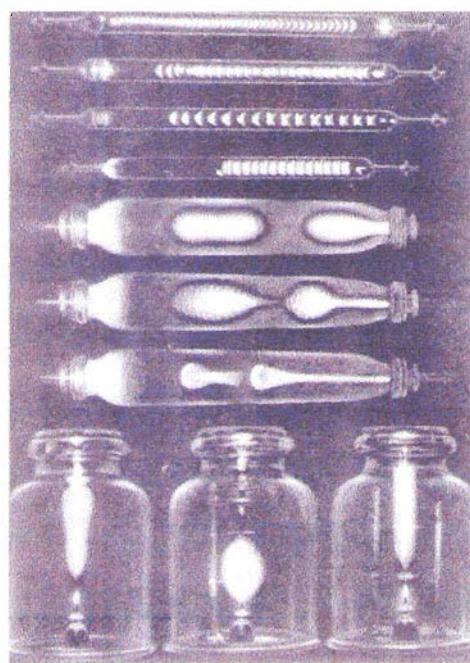


Figura 1 Descargas elétricas em gases a baixa pressão [8, p.20].

Com a atmosfera reduzida, usando a bomba de Geissler, Julius Plücker observa que a luz desaparece, mas surge um intenso brilho esverdeado, próximo ao catodo<sup>1</sup>, que parecia sair dele e produzir um brilho na frente do tubo, após viajar pelo gás rarefeito em seu interior. Eugen Goldstein denomina esse fenômeno de raios catódicos. Plücker observou que eles são defletidos quando se aproxima um imã; isso evidencia que os raios catódicos são constituídos por alguma espécie de material portador de carga elétrica em movimento. John W. Hittorf observa que objetos opacos colocados entre o catodo e o anodo produzem sombras na parede do tubo; isso mostra que partem do catodo em linha reta.

William Crookes dá um novo formato ao tubo de vácuo. O tubo modificado ficou conhecido como ampola de Crookes (que existe, numa versão mais sofisticada, com o nome de tubo de imagem ou tubo de televisão). Crookes observa, também, o surgimento de sombras na ampola (figura 2) e conclui, erroneamente, que os raios são formados pelas moléculas do gás contido no tubo de vidro.

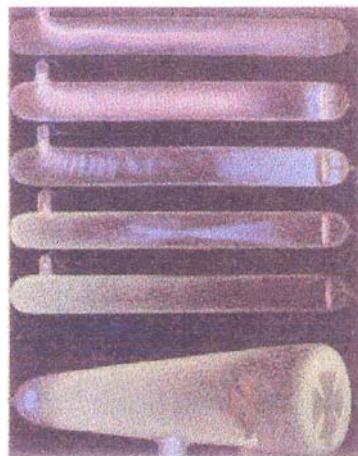


Figura 2. Ampolas de Crookes [7, p.23]

---

<sup>1</sup> A placa ligada ao terminal da fonte de eletricidade positiva é chamada anodo e a ligada ao terminal negativo é chamada catodo.

Mas, isso é desmentido por um experimento realizado por Goldstein. Ele mostra que, [8, p. 24] “[...] num tubo de raios catódicos, com uma pressão interna igual a  $10^{-6}$  atm da pressão normal do ar, os raios catódicos se deslocam pelo menos 90cm, enquanto, o livre percurso típico de uma molécula de ar nessa mesma pressão deve ser, somente, cerca de 0,6cm.”

Por volta de 1890, havia duas correntes de pensamento em relação a natureza dos raios catódicos: Alguns acreditavam tratar-se de partículas muito velozes carregadas, enquanto outros, como Heinrich Hertz, acreditavam tratar-se de vibrações ondulatórias. Jean Baptiste Perrin (1895) mostrou que os raios catódicos carregam negativamente, um coletor de cargas colocado no interior do tubo de vácuo, evidenciando, assim, natureza não ondulatória, mas material [8, p.24]. Mas se não pode ser formado dessas moléculas, que tipo de matéria é o raio catódico?

## II. 4 – Descoberta do Elétron

Em 1897, J.J. Thomson realiza uma série de experimentos com o objetivo de determinar a natureza dos raios catódicos. Observa que eles são defletidos, quando um campo elétrico e um campo magnético perpendiculares entre si são aplicados, como pode ser visto na figura 3; é uma propriedade desses campos defletir cargas positivas para um lado e cargas negativas para o lado oposto. Como os raios catódicos são defletidos por campos elétrico e magnético, devem ser portadores de carga; no caso, a direção de deflexão determina que a carga é negativa.

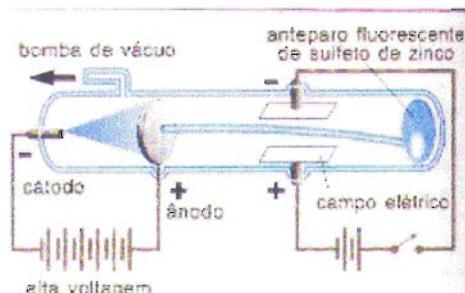


Figura 3. Deflexão do raio catódico sob a ação de um campo elétrico [9, p.88]

Thomson resolve, então, determinar a razão massa/carga desses portadores de cargas negativas. Esse método se encontra descrito em detalhes no *apêndice 1*. Obteve os seguintes resultados: Os valores da razão massa/carga das supostas partículas que constituem os raios catódicos mantêm-se muito próximos, independente da natureza do gás (ar, hidrogênio, dióxido de carbono) contido no tubo de vácuo. Esse resultado, segundo Thomson, corrobora a tese de que [8, p.55] “[...] os raios catódicos consistem de um único tipo de partícula, com um único valor de massa e carga”. Thomson foi bem mais longe do que a descoberta da natureza dos raios catódicos. [8,p.66] “Ele saltou para concluir que essas partículas são constituintes fundamentais de toda matéria ordinária. Em suas palavras: (apud [8], p.66)

[...] nós temos nos raios catódicos matéria em um novo estado, um estado no qual a subdivisão da matéria é transportada, muito além, daquela no estado gasoso ordinário: um estado no qual toda matéria – isto é, matéria obtida de diferentes fontes tais como hidrogênio, oxigênio, etc. – é de uma e mesma espécie; sendo esta matéria a substância a partir da qual os elementos químicos são construídos.

A conclusão da existência do elétron a partir do experimento de Thomson não é imediata. Segundo Steven Weinberg [8, p.67]:

[...] não existe nem um meio de que a existência de partículas diminutas, dentro do átomo possa ser verificada com base nos experimentos de Thomson, de 1897. Thomson não afirmou que tinha provado a existência delas, porém havia alguns indícios que o guiava para essa conclusão.

Os indícios a que se refere Weinberg são: a constância no valor da razão massa/carga da partícula do raio catódico, seja qual for, o gás contido no tubo e o material do eletrodo e os valores similares da razão massa/carga obtida por Pieter Zeeman para portadores de corrente elétrica no átomo, através

do estudo do espectro do elemento sódio (Na), quando submetido a um campo magnético (*apêndice 2*). Assim, as medidas de Zeeman e os trabalhos de Thomson sobre os raios catódicos mostraram que esses portadores de carga negativa fazem parte da estrutura do átomo e possuem existência própria, quando estão dentro e quando estão fora do átomo [8, ps.67-69].

Weinberg conclui [8, p.69] :

[...] A universalidade dessas partículas foi imediatamente verificada quando os então chamados *raio beta* [*apêndice 3*] que era observador ser emitido por substâncias radioativas foi encontrado (por método similar ao de Thomson) ter a mesma razão carga/massa das partículas dos raios catódicos.

Outros experimentos mostram que a massa dessa partícula é, aproximadamente, duas mil vezes menor que a massa do átomo de H (hidrogênio), o átomo mais leve conhecido no Universo. George Johnstone Stoney já havia cunhado o termo *elétron* para a unidade de carga elétrica, e por isso, esse termo veio denominar, também, a partícula por Thomson. [8, p.71].

## II. 5 – O Átomo de Thomson

Após a descoberta do elétron, Thomson coloca o seguinte problema: O átomo é eletricamente neutro; por outro lado, se essa partícula for parte da estrutura do átomo, então ele contém carga negativa; logo deve possuir, também, uma carga positiva de mesmo valor em seu interior. Assim, qual é a estrutura do átomo?

Em 1898, Thomson cria um modelo atômico conhecido como Modelo do Átomo de Thomson, ou modelo do “pudim de passas”. Nesse modelo, o átomo consiste de uma esfera maciça de carga elétrica positiva, na qual estão

contidos alguns elétrons, como passas em um pudim, daí o nome; a maior parte da massa do átomo esta na porção positiva [7,p.32].

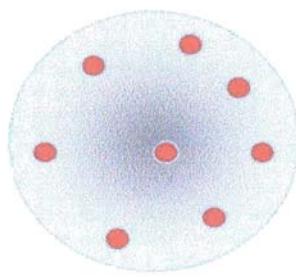


Figura 4. Modelo do Átomo de Thomson: Esferas vermelhas representam os elétrons e a região em azul, esfera maciça, a carga positiva.

## II. 6 – Os Raios-X

Este tipo de radiação foi descoberto por Wilhelm Röntgen, em 1895. Ele, como vários cientistas da época, investigava o brilho na ampola de Crookies. Casualmente, Röntgen deixou uma placa fotográfica virgem, embrulhada num papel preto, próxima à ampola de Crookies (figura 2). Quando preciso da placa, observou que ela estava velada. Surpreso com o fato colocou, novamente, placas fotográficas virgens próximas ao tubo. O resultado era sempre o mesmo: as placas, mesmo embrulhadas, velavam. Uma noite, depois de ter saído do laboratório, lembrou que não havia desligado a ampola de Crookies e retornou à sala, cujas luzes estavam apagadas, e percebeu um brilho que vinha de uma folha de papel sobre uma mesa. Essa folha estava revestida com uma camada de platinocianídio de bário. Sabia-se que essa substância, quando intensamente iluminada, emite um brilho fraco. Mas o laboratório estava no escuro. A ampola de Crookies estava coberta com um papelão preto. Então, de onde vinha a luz que fazia tal substância brilhar? Röntgen pensou: as placas fotográficas velaram, quando estavam próximas à ampola de Crookies; ora, o platinocianídio de bário também estava próximo à ampola. Suspeitou, então, que o responsável por tais fenômenos poderia ser algum tipo

de raio invisível, proveniente da ampola de Crookies; ele o chamou de raios-X (*apêndice 2*). Röntgen logo descobriu muitas propriedades surpreendentes desses raios: sua capacidade de penetrar facilmente vários objetos opacos; de eletrizar o ar (ionizar), tornando-o bom condutor elétrico à pressão normal.

[7, p. 24-25].



Figura 5. Fotografia do primeiro raios-X de um ser humano, tirado por Röntgen, mostrando a mão da sua esposa com o anel que ela estava usando [7, p.25].

## II. 7 – Descoberta da Radioatividade

Quando trabalhava com seu pai, em experimentos que envolviam sais de urânio, Antoine Henri Becquerel observou que os cristais desses sais, quando colocados em ambientes mais escuros, continuavam a emitir um brilho, por algum tempo, mesmo retirado da exposição solar (fosforescência). Resolveu, então, investigar se alguns cristais de sais, inclusive sais de urânio, poderiam emitir raios semelhantes aos raios-X, sob ação da luz solar. Becquerel, em 1896, preparou um aparato experimental para observar se o bissulfato de uranila e potássio (um sal de urânio) emitia raios-X. Como o dia estava nublado, desistiu de fazer a experiência. Guardou na gaveta da escrivaninha as placas fotográficas, embrulhadas em papel preto, junto com os sais de urânio; entre eles, colocou duas pequenas lâminas de cobre. Becquerel sabia que os raios-X não penetravam lâminas metálicas. Uma semana depois, resolveu desembrulhar a placa, certo de que, sem a luz solar, haveria muito pouco efei-

to dos cristais sobre a placa. Porém, ao contrário do que esperava, Becquerel encontrou uma imagem muito nítida das lâminas na placa (figura 6). Supôs, então, que os sais de urânio houvessem emitido alguma radiação invisível, mesmo no escuro, de modo que uma imagem pudesse ser formada. Becquerel escreveu o seguinte em suas anotações (apud [8] p.112):

De 3 de março a 3 de maio os sais foram colocados em uma caixa de chumbo e essa, mantida no escuro [...]. Nessas circunstâncias, os sais continuavam emitindo radiação ativa [...]. Todos os sais de urânio que eu estudava, fossem fosforescentes ou não na luz ou em solução, davam-me resultados semelhantes. Eu fui levado, assim, à conclusão de que o efeito é devido à presença do elemento urânio nesses sais.

Essa radiação apresenta algumas propriedades semelhantes às do raios-X, tais como atuar sobre placas fotográficas virgens, ionizar o ar, separando-o em suas componentes positiva e negativa. Porém, ao contrário dos raios-X, essa radiação não penetra materiais; além disso, o urânio e seus compostos a emitem espontaneamente por um longo período. Hoje, sabe-se que uma amostra de urânio emite tal radiação por milênios.



Figura 6. Primeira fotografia obtida, mostrando a radioatividade descoberta por Becquerel [7, p.26].

Marie Skłodowska Curie e seu marido Pierre Curie, assim que tomaram conhecimento da descoberta de Becquerel, resolveram investigar essa nova

espécie de radiação. Marie, em sua tese de doutorado, pesquisou se havia outros elementos químicos que emitem a nova radiação e determinou as suas taxas de emissão, utilizando novas técnicas desenvolvidas por seu marido. Descobre, em 1898, que o tório emana essa radiação; isolou dois novos elementos radioativos, o polônio e o rádio, sendo esse último, milhares de vezes mais radioativo que o urânio. O trabalho do casal Curie era árduo. De uma tonelada de pechblenda, um minério de urânio, eles extraíam poucas gramas de polônio e rádio. O casal Curie denominou radioatividade, o fenômeno da emissão dessa nova radiação pelos elementos radioativos.

## **II. 8 – A Descoberta do Núcleo Atômico e do Próton**

Ernest Rutherford, assistente de Thomson, estudava os efeitos da radiação emitida pelo urânio e pelos raios-X na condução de corrente elétrica, em gases ionizados. Entre 1897-98, mostra que essas radiações atuam essencialmente da mesma forma: Arrancam os elétrons dos átomos do gás, ionizando-os, e esses elétrons, então, transportam a corrente elétrica. Nessa mesma época, seu interesse era o estudo da natureza da radioatividade, utilizando a ionização de gases como instrumento de investigação. Em 1898, identificou duas componentes da radioatividade no urânio radioativo, que ele denomina radiação alfa e radiação beta (*apêndice 3*). Observou que a radiação alfa é “pouco penetrante”, isto é, pode ser barrada por uma folha de alumínio fina, enquanto que a radiação beta é tão “penetrante” quanto os raios-X. Em 1899, Becquerel descobre que a radiação beta de Rutherford pode ser defletida por um campo magnético, na mesma direção em que os raios catódicos seriam; o que aponta para a presença de cargas negativas. Determina a razão massa/carga da radiação beta, usando o método de Thomson (*apêndice 1*), e encontra valores muito próximos ao da razão carga/massa dos raios catódicos. Essa pesquisa de Bec-

querel mostra que a radiação beta é constituída por elétrons com velocidade superior à velocidade dos elétrons do raio catódico [8, p.114].

Em 1903 e, mais tarde, em 1906, Rutherford investiga a natureza das partículas alfa. Determina a razão massa/carga delas, encontrando um valor duas vezes maior que a razão massa/carga do Hidrogênio ionizado (hidrogênio sem elétron). Uma possibilidade seria uma partícula de mesma carga do Hidrogênio ionizado, mas com uma massa duas vezes maior. No entanto, o próximo elemento na tabela periódica de Mendeleiev é o Hélio, que tem massa quatro vezes maior que a do Hidrogênio. Rutherford supôs que as partículas alfa pudesse ser íons de Hélio, se esse tivesse carga 2<sup>1</sup>. Ele idealizou um experimento que lhe permitisse identificar a natureza da partícula alfa [8, p.115]. Em 1908, Rutherford e T.D. Poys conseguiram coletar em um tubo, uma grande quantidade de partículas alfa, emitidas por uma amostra de rádio. Elas se “desionizavam”, capturando elétrons do ar no tubo. O gás coletado era, então, estimulado a emitir luz. O espectro dessa luz revelou-se idêntico ao do gás Hélio. Isso demonstrou definitivamente, que as partículas alfa são núcleos do elemento Helio, duplamente ionizado [7, p.33].

---

<sup>1</sup> Isso estaria em conformidade com resultados obtidos em 1895 por William Ramsay, que observou linhas espectrais do Hélio na análise espectral de materiais radioativos. Em 1868, cientistas fizeram a análise espectral da luz emitida pelo Sol, durante um eclipse, para determinar os elementos presentes nessa estrela. Observaram que a maioria das linhas desse espectro eram semelhantes àquelas produzidas por vários elementos químicos, em laboratórios na Terra. Porém, um grupo de linhas observadas não se assemelhava à de qualquer elemento conhecido. J. Lockyer admite, então, que elas deveriam pertencer a um novo elemento, que não existe na Terra e o denominou Hélio, pois em grego Sol é *Helium* [8,p.115].

A terceira espécie de radioatividade foi descoberta por Rutherford em 1900 e observada pela primeira vez por P. Villard, nesse mesmo ano. Quando Rutherford substitui o Urânio pelo Tório em seus experimentos, observa que, além das radiações alfa e beta, esse elemento emite uma terceira espécie de radiação, muito mais penetrante do que a radiação beta. Essa radiação foi denominada radiação gama [7, p.30] e [8,115]. Ela não sofre deslocamento por campos elétrico e magnético, significando que não apresenta carga; Rutherford supôs, então, que fosse uma onda eletromagnética como os raios-X, porém, com um comprimento de onda muito menor, por ser mais penetrante. Denominou raio gama essa nova radiação. Essa hipótese de Rutherford só foi confirmada em 1914, depois de medir o comprimento de onda dessa radiação [8, p.115].

Em 1907, Rutherford revolve investigar um fenômeno que ele observou, durante o tempo em que trabalhava na Universidade McGill: as partículas alfa produzem uma imagem em forma de floco sobre uma placa fotográfica, ao atravessarem uma fina folha de mica. Essa imagem fotográfica mostra que as partículas alfa são espalhadas pela mica e desviada de sua trajetória retilínea original [7,p.33]. Ora, as partículas alfa eram emitidas por um elemento radioativo, com grandes velocidades. Rutherford sabia que forças elétricas ou magnéticas muito intensas poderiam desviá-las muito pouco da trajetória original. Logo, como poderia uma pequena folha de mica ocasionar um desvio bem maior? Rutherford supôs, então, que deveria existir uma força muito intensa dentro dos átomos da mica, responsável pelo espalhamento observado. Rutherford, Geiger e Marsden resolvem determinar os ângulos de espalhamento das partículas alfa bombardeando folhas finas de ouro, cujo átomo é muito pesado (massa atômica 196,97). Tomando como certo o modelo atômico de Thomson, Rutherford esperava que a maioria das partículas alfa atravessassem a lâmina sem espalhamento, ocorrendo, eventualmente, alguns com pequenos ângulos (figura 7).

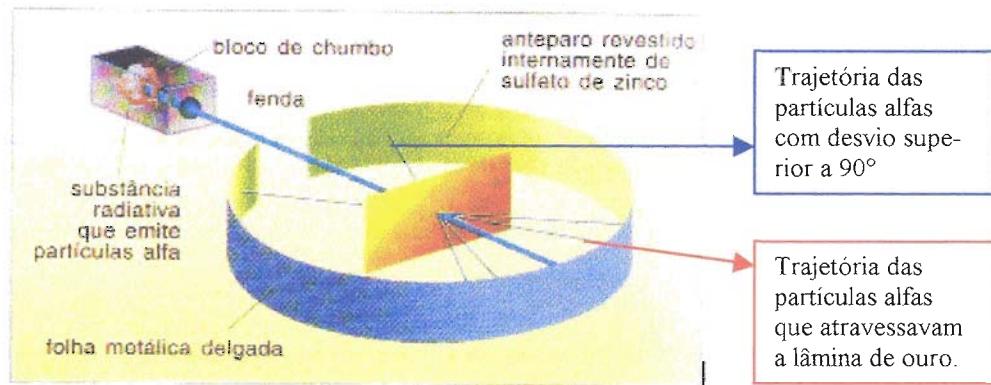


Figura 7. Experimento de Rutherford sobre espalhamento de partículas alfas [9, p.92].

Para sua surpresa, um número considerável das partículas sofria grandes desvios, isto é voltavam para trás (para algumas o ângulo era maior que  $90^\circ$ ). As partículas alfa eram dificilmente defletidas pelas mais fortes forças elétricas conhecidas na época; no entanto eram mandadas de voltas por uma folha fina, de  $4,0 \times 10^{-5}$  cm de espessura. Rutherford sabia que as partículas alfa carregavam duas cargas positivas e conhecia a velocidade com que as partículas alfa eram emitidas; com esses dados seria possível calcular a distância que as partículas alfa teriam de se aproximar da carga positiva do átomo para serem defletidas de um dado ângulo: As partículas alfa são desaceleradas pela carga positiva do átomo, até que parem e sejam, então, defletidas. De acordo com os cálculos de Rutherford, uma partícula alfa, para retornar completamente, não poderia chegar a menos de  $6,6 \times 10^{-12}$  cm do centro atômico. Isso significa que a carga positiva está concentrada em um raio da ordem de  $10^{-12}$  cm. Logo, o modelo de Thomson não poderia estar correto. Em 1910, Rutherford propôs que os átomos são formados por um núcleo compacto, carregado positivamente, em torno do qual os elétrons giram a uma distância relativamente grande, semelhante a um sistema solar em miniatura.



Fig.8 - Modelo de Rutherford – núcleo (azul) com carga positiva com os elétrons de carga negativa (vermelho) girando a sua volta.

Após propor seu modelo do átomo, Rutherford investiga a estrutura do núcleo. Começa uma série de experiências com a finalidade de determinar se a carga positiva do núcleo seria, como no caso da carga negativa, formada por alguma partícula. O bombardeamento de átomos de ouro por partículas alfa revelou a existência do núcleo, mas não permitiu maiores informações sobre sua constituição. A carga nuclear do átomo de ouro é muito superior àquela da partícula alfa e, portanto, as partículas alfa são repelidas antes de alcançar o núcleo. Rutherford conjecturou, então, que as partículas alfa pudessem chegar muito mais perto do núcleo de átomos leves, pois, neles, a carga nuclear positiva é menor. Utilizou o Hidrogênio para investigar a natureza do núcleo, por ser o elemento mais leve conhecido. Rutherford e Madsen disparam partículas alfa sobre o gás Hidrogênio. Todas as partículas alfa partiam de uma mesma fonte radioativa e colidiam, sucessivamente, com as moléculas de Hidrogênio, perdendo energia. Assim, todas as partículas alfa deveriam parar mais ou menos a uma mesma distância da fonte radioativa, pois são emitidas com a mesma velocidade (energia cinética). Entretanto, observou que havia partículas com alcance maior do que o das partículas alfa, significando que foram emitidas com maior velocidades; além disso, a deflexão dessas partículas por um campo magnético mostrou que têm carga positiva. Rutherford sugeriu que essas partículas fossem núcleos de Hidrogênio, arrancados de sua posição no átomo, pelas partículas alfa. Ele as denominou partículas-H. Em 1919, após dois anos de minuciosa investigação para eliminar outras possíveis

explicações para o que observava no experimento, Rutherford anuncia sua descoberta: A carga positiva do núcleo é carregada por partículas, que denominou próton (palavra grega que significa primeira). Assim, o átomo é eletricamente neutro porque o número de prótons no núcleo é igual ao número de elétrons na eletrosfera [7, ps.33-36].

## II. 9 – O Nêutron

Apesar da descoberta do próton, a natureza do núcleo não ficou totalmente resolvida. A massa do próton é cerca de 2000 vezes maior que a massa do elétron, logo pode-se admitir que a massa do átomo esteja quase toda contida no núcleo. Porém, quando os cientistas determinavam a massa atômica, principalmente a dos elementos mais pesados, havia uma discrepância muito grande entre o valor experimental e o valor teórico. Por exemplo, sabia-se que o elemento He possui dois elétrons e dois prótons; logo, sua massa atômica deveria ser o dobro da massa do próton; entretanto, os dados experimentais davam como resultado, uma massa atômica que era o quádruplo da massa do próton. Para solucionar esse problema, Rutherford postula em 1920 a existência de uma outra partícula no núcleo, cuja carga elétrica fosse nula e cuja massa fosse aproximadamente igual a massa do próton [7, p.39].

Em 1932, James Chadwick detecta a partícula prevista por Rutherford. Ela foi denominada *nêutron*. Com a descoberta dessa partícula, foi possível explicar porque certos elementos químicos que possuem o mesmo número de prótons apresentam diferente massa atômica. Isso acontece, porque eles apresentam diferentes quantidades de nêutrons no núcleo. Os elementos químicos que possuem mesmo número de prótons e diferentes massas atômicas são chamados isótopos.

## II. 10 – Fissão Nuclear e Fusão Nuclear

### Fissão

Em 1934, Irene Curie e Frédéric Joliot descobriram a radioatividade artificial: Bombardeando átomos estáveis (não radioativos) com partículas alfa, os átomos tornavam-se radioativos; isso é chamado radioatividade artificial.

Enrico Fermi, diferentemente, resolveu utilizar nêutrons como projéteis, em vez de partículas alfa. Pretendia verificar se eles seriam mais eficientes como projéteis nucleares: Por não possuírem carga elétrica, não seriam repelidos ou atraídos pelos núcleos, como acontece com as partículas alfa e com os prótons. Encontrou o seguinte resultado: Nêutrons lentos (que tem energia de aproximadamente 10 eV) são sempre capturados por núcleos pesados, tornando-os radioativos. Porém, os nêutrons rápidos (que tem energia de aproximadamente 1MeV) nunca são capturados por esses núcleos. Em fevereiro de 1934, Fermi publica seus primeiros resultados: núcleos de vários elementos químicos estáveis transformam-se em elementos radioativos, quando bombardeado por nêutrons [10].

Otto Hahn e Fritz Strassmann descobriram, em 1939, que metais alcalinos terrosos são produzidos quando urânio (número atômico 92 e massa atômica 235) é bombardeado com nêutrons [11]. Esse resultado era surpreendente, uma vez que eles esperavam obter elementos transurânicos e, no entanto, obtiveram, na mistura resultante, um elemento muito mais leve, o Ba (número atômico 56). Lise Meitner e Otto R. Frisch sugeriram que pela absorção de um nêutron, os núcleos de urânio 235 transformam-se em U236 instável e, então, divide-se em dois fragmentos de massas aproximadamente iguais. [12]

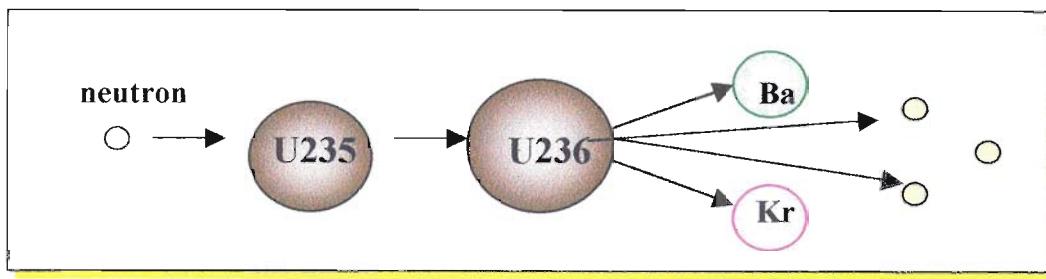
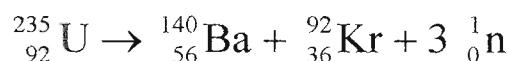


Figura 9. U235 é alvejado por um nêutron, divide-se produzindo dois elementos radioativos mais leves e liberando 3 nêutrons.

A figura representa a seguinte equação nuclear que descreve o processo:



onde os índices superiores são as massas atômicas dos elementos e os inferiores, os números atômicos (número de prótons no núcleo do átomo). Essa divisão do urânio em dois núcleos mais leves é chamada fissão.

John Archibald Wheeler e Bohr [13] propõem um modelo para a fissão: Não ocorre uma quebra repentina do núcleo em dois fragmentos. Após ser atingido pelo nêutron, o núcleo começa a vibrar, passando por uma série de alongamentos, ocasionando um desequilíbrio entre a tensão superficial, que tenta manter a forma esférica do núcleo instável, e as forças elétricas, que tentam manter o alongamento. Quando as forças elétricas superam a tensão superficial, de um determinado valor, o núcleo original se divide formando dois núcleos mais leves [14, p.328].

Nesse mesmo ano, Fermi percebe que os nêutrons resultantes do processo de fissão do U235 poderiam atingir outros núcleos de átomos vizinhos na amostra e provocar novas fissões, com liberação de mais nêutrons e, assim, sucessivamente. Esse encadeamento de fissões foi denominado reação em cadeia. A primeira reação em cadeia foi obtida em 1942, por um grupo de fisicos, liderado por Fermi, na Universidade de Chicago.

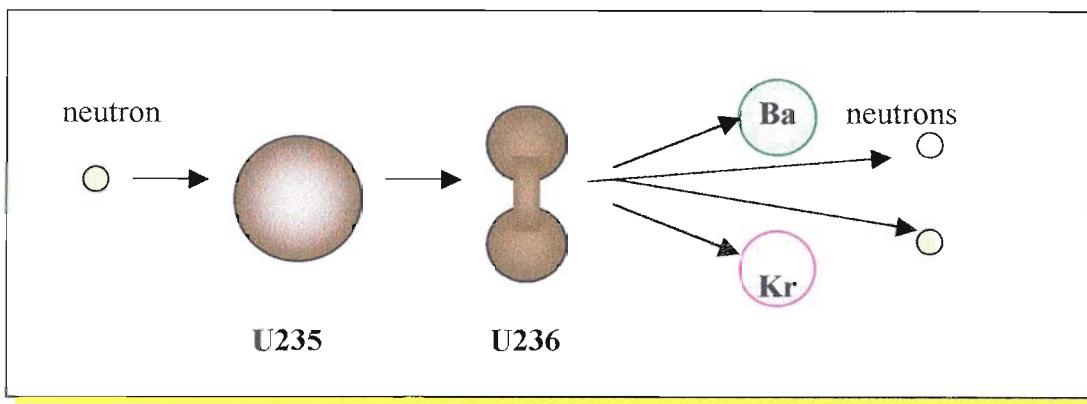


Figura 10. Modelo de Bohr e Wheeler para a fissão nuclear.

### Fusão

A descoberta do processo de fusão nuclear surgiu de uma linha de investigação diferente daquela que possibilitou a do processo de fissão. Os astrônomos e os físicos cogitavam sobre os mecanismos que seriam responsáveis pela emissão da radiação do Sol e demais estrelas, por um tempo tão grande, da ordem de bilhões de anos. Em 1929, Robert Atkinson e Fritz Houtermans propuseram que emissão seria o resultado de transformações nucleares, induzidas por colisões entre os átomos altamente energéticos nas regiões mais internas e quentes das estrelas; a alta velocidade desses átomos aumenta a probabilidade de colisões entre eles. Utilizando os valores das temperaturas e densidades<sup>1</sup> obtidas para a região central do Sol, Houtermans e Atkinson demonstraram ser possível a liberação de energia em quantidade suficiente para explicar a radiação emitida pelo Sol, por meio de reações termonucleares<sup>2</sup> entre núcleos de Hidrogênio (prótons) e os núcleos de elementos leves (massa atômica pequena).

<sup>1</sup>Temperatura do Sol - região central  $\approx$  14,5 milhões de °C ; na superfície  $\approx$  6 mil °C

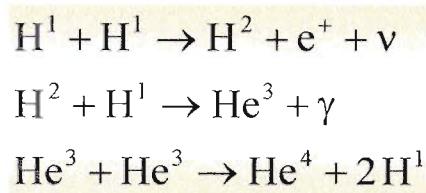
Densidade do Sol -  $\approx$  134 g/cm<sup>3</sup>

Pressão  $\approx$  221 bilhões de atmosferas

<sup>2</sup> Reações termonucleares – reações nucleares que ocorrem em altas temperaturas.

Charles Critchfield, dez anos depois, propôs um processo de fusão, denominado ciclo próton-próton (ou ciclo H – H). Participam desse ciclo quatro prótons, que se fundem para formar o núcleo de Hélio, durante a fusão ocorre a transformação de dois prótons em dois nêutrons [15, p.335].

As reações que ocorrem nesse processo são:



onde  $\text{e}^+$  é uma partícula denominada pósitron, que tem massa e carga numericamente igual a do elétron, sendo porém a carga positiva;  $\nu$  é uma partícula chamada neutrino, que possui massa muito próximo de zero e carga elétrica nula e  $\gamma$  o raio gama.

Para estrelas menos brilhantes que o Sol, a produção de energia segue o ciclo H – H. Para estrelas mais brilhantes um outro ciclo (ciclo do carbono), foi proposto independentemente por Hans Bethe e Carl von Weizsackerr. Nesse ciclo o átomo de carbono captura quatro prótons: dois deles se transformam em dois nêutrons. Após uma série de reações nucleares ocorre a formação do núcleo de Hélio, que é, então, emitido [15, p.336].

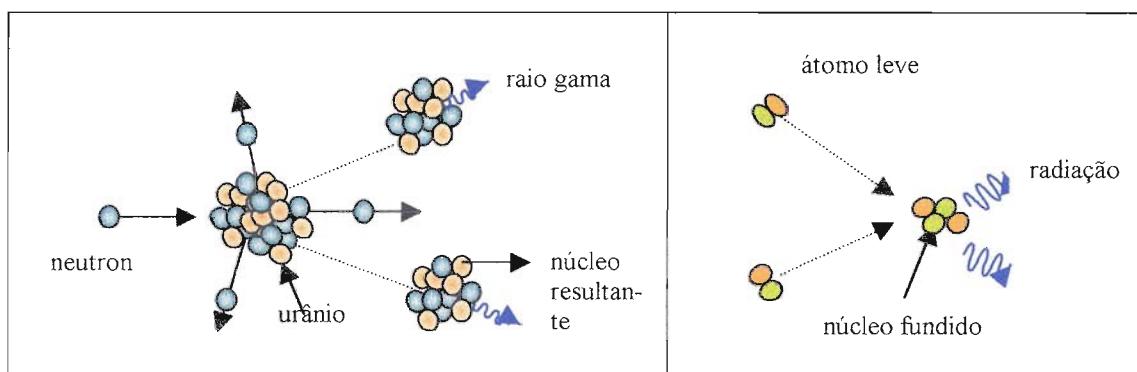


Fig.11 – Reação de fissão e fusão nuclear respectivamente.

## II. 11 – A Energia Quantizada

Em 1900, Max Planck desenvolveu uma teoria, denominada Teoria Quântica, para explicar a energia emitida por um corpo incandescente. É sabido que, quanto mais quente um corpo estiver, maior será a vibração (oscilação) das partículas que o constitui. Planck postula que essas partículas vibram com quantidades bem definidas de energia, que ele denominou *quanta*. Postula, também, que, quando a partícula oscilante passa de um estado de maior energia para um estado de menor energia, ela emite um *quantum* (singular de *quanta*) em forma de radiação, com freqüência  $\nu$ . Em caso contrário, quando passa de um estado de menor energia para um estado de maior energia, ela absorve um *quantum*. De acordo com Planck, a expressão que permite calcular a energia do *quantum* emitido ou absorvido é:

$$E = h \cdot \nu \quad (\text{II.10.1})$$

Nessa expressão,  $E$  é a energia do *quantum*,  $h$  é a constante de Planck e  $\nu$  é a freqüência da radiação emitida ou absorvida pela partícula. Logo, a quantidade energia emitida ou absorvida será sempre  $E$  ou um múltiplo de  $E$  [9, p.105].

[...] A cada radiação e a cada onda eletromagnética está associada uma freqüência e, segundo Planck, a cada freqüência está associado um pacotinho de energia: o *quantum*.

Nessa Teoria desenvolvida por Planck, a emissão ou absorção de energia não ocorre mais de forma contínua. Ela é transferida através de pequenas quantidades definidas de energia, o *quantum*. Por isso, diz-se que a energia é quantizada. Em 1905, Albert Einstein denominou **fóton**, o quantum associado à freqüência da luz visível.

## II. 12 – O Átomo de Bohr

Rutherford, Bohr e outros cientistas da época reconheciam que havia uma imperfeição na idéia de elétrons girando em torno do núcleo. De acordo com as leis do eletromagnetismo, um elétron orbitando um núcleo, seja em órbita circular ou elíptica, emite radiação eletromagnética (energia radiante) continuamente, devido à aceleração centrípeta, causada pelas forças elétricas (chamadas forças coulombianas); com a perda da energia, aproxima-se do núcleo, em um movimento espiral. Isso aniquila o átomo, em fração de segundos. Ora, não poderia, então, existir a matéria do mundo como a sentimos e vemos. [7, p.35]

Em 1913, Bohr propõe que a maneira de solucionar esse dilema seria através de modificações na Física Clássica. Ele propõe, então, um modelo atômico para o átomo de Hidrogênio, fazendo uma série de considerações muito incomuns naquela época. Na formulação dessa teoria, Bohr utiliza os postulados de Planck sobre a quantização da energia e os resultados do espectroscopista Balmer (*apêndice 2*), relacionados com o espectro atômico do Hidrogênio. Na verdade, foi através da análise da fórmula de Balmer que Bohr visualizou a possibilidade de explicar o espectro de emissão de Hidrogênio em termos de *quanta* de energia [16, ps.98,99]. Bohr postula entre outras coisas: a) os elétrons giram em torno do núcleo em órbitas circulares bem definidas sem emitir radiação; b) quando um elétron, localizado em uma órbita mais externa de energia  $E_i$  (energia inicial), salta para uma órbita mais interna de energia  $E_f$  (energia final), **emite** um *quantum* de energia em forma de radiação (luz, microondas, etc.). A energia de cada quantum dessa radiação é igual à diferença de energia das duas órbitas.

$$E = E_i - E_f \quad (\text{II.11.1})$$

c) contrariamente, quando um elétron localizado numa órbita mais interna, de energia  $E_i$ , **absorve** um *quantum* de luz, ele salta para uma órbita mais externa de energia  $E_f$ .

Cada uma das órbitas permitidas foi denominada nível ou camada de energia. Assim: o nível com  $n = 1$  (órbita estável mais interna), corresponde à camada K; o nível com  $n = 2$  corresponde à camada L, e assim sucessivamente.

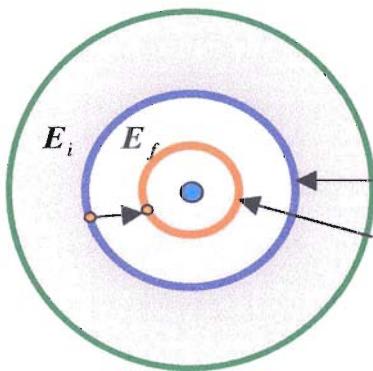


Figura 13. Modelo atômico de Bohr. As circunferências, verde, azul e vermelha representam as órbitas permitidas. As flechas indicam os saltos dos elétrons de uma órbita mais externa para outra mais interna emitindo um *quantum* de energia.

## II. 13 – Novas Partículas

Com a descoberta do elétron, do próton e do nêutron, os cientistascreditavam que a estrutura da matéria estivesse, finalmente, revelada. Toda a matéria do mundo seria formada por átomos, sendo eles mesmos constituídos de elétrons, prótons e nêutrons.

A descoberta de partículas inesperadas foi um resultado de investigação em raios cósmicos. Mesmo na ausência das fontes radioativas comuns, descritas nesse trabalho, foi notada a existência de uma radiação ionizante de fundo. Em 1912, Victor Hess propôs que a radiação viesse do espaço, pois aumenta-

va com a altitude. As medidas eram feitas com balões tripulados, a cerca de 3000 metros. A partir de 1926, Robert Millikan aboliu a tripulação nos balões; as medidas passaram a ser feitas por aparelhos. Foi ele que criou a expressão raios cósmicos.

O aparelho básico para detetar esses raios é a câmara de Wilson, inventada em 1895, por Charles Wilson (*apêndice 4*).

Experiências de raios cósmicos levaram à deteção de novas partículas, o pósitron (1932) e o múon (1937). A primeira partícula era uma consequência natural da equação do elétron, escrita por Paul Adrien Maurice Dirac. A segunda havia sido postulada para explicar a força que une nêutrons e prótons em um espaço tão pequeno, o núcleo; entretanto, por ironia, a partícula detectada não tinha a massa da partícula postulada; em outras palavras era uma terceira partícula. Isso foi surpreendente, pois não havia nada nas teorias que pudesse ter levado os físicos a investigar a existência da terceira partícula. A que vinha, então?

Novas surpresas vieram. Acreditam ou não, do Brasil. Dois jovens cientistas brasileiros, Marcello Damy de Sousa Santos e Paulus Aulus Pompéia, sob orientação de Gleb Wataghin, “embrulharam” seus contadores em grossa camada de chumbo e foram para o túnel da Avenida 9 de Julho, em São Paulo, em construção na época. Somente raios muito “penetrantes” poderiam, então, atingir os contadores. O que eles determinaram foi um conjunto de partículas, emitidas simultaneamente, que receberam o nome de Chuveiros Penetrantes. A rigor, o raio cósmico causa uma reação nuclear múltipla no chumbo que cobre a aparelhagem.

Repetindo esse tipo de experimento G. Rochester e Clifford Betler detectaram, em 1947, uma partícula cujo traço na câmara parecia um ‘V’, daí receberam o nome de “Partículas V”. Essas foram as primeiras de uma família de partículas chamadas “estranhas”, pelo seu “estranho” tempo de vida. Daqui para frente, é a Física de Partículas [17, p.114]

## II. 14 – Partículas Subnucleares e o Átomo

As partículas que se conhece foram classificadas de vários modos:

**1º) pelo spin<sup>1</sup>** – partículas que apresentam spin fracionário são chamadas *fermions*. Fazem parte deste grupo prótons, elétrons e nêutrons, que apresentam spin  $\frac{1}{2}$ . Aquelas cujo spin é um número inteiro, são chamadas *bósons*. Pertence a esse grupo o fóton<sup>2</sup>, que possui spin 1.

**2º) pela força** – considerando-se os tipos de interação que atuam entre as partículas, como critério de classificação, elas foram divididas em dois grupos: a) *léptons*, que sofrem a ação da interação fraca. Estão presente nesse grupo, o elétron, os mûon e o tau com os seus respectivos neutrinos<sup>3</sup>; b) *hádrons*, que sofrem interações forte e fraca. Esse grupo foi subdividido em: mésons, que são hádrons com spin inteiro e bárions, que são hádrons com spin fracionário [18, p.307].

---

<sup>1</sup>spin – é uma propriedade das partículas subatômicas que tem todas as características de uma rotação; imagina-se que a partícula gira em torno do seu próprio eixo, mas, é prematuro, na atual fase do conhecimento, dizer que, realmente isso se passa.



<sup>2</sup>fóton – partícula de massa de repouso zero, carga elétrica zero que viaja com a velocidade da luz (300.000 km/s).

<sup>3</sup>neutrinos – partículas de carga elétrica zero e massa próxima a zero, cuja existência foi proposta por Fermi, em 1933.

**Tabela 1** – Classificação das partículas subatômicas quanto ao spin e quanto a força de interação.

Categoría	Spin	Exemplos	
Férmions	semi-inteiros	prótons (1/2); elétrons (1/2); nêutrons (1/2); neutrino (1/2)etc...	
Bósons	inteiros	fôtons (1);	
Categoría	Sub-categoría	Força	Exemplo
Léptons		Fraca	elétrons, múon, tâuon, neutrinos
Hádrons	Bárions Mésons	Forte	prótons, nêutrons, píons

**Tabela 2** – Os léptons

Partícula	Símbolo	Carga	Antipartícula
Elétron Neutrino-elétron	$e^-$ $\nu_e$	-1 0	$e^+$ $\bar{\nu}_e$
Míon Neutrino-míon	$\mu^-$ $\nu_\mu$	-1 0	$\mu^+$ $\bar{\nu}_\mu$
Tâuon Neutrino-tâuon	$\tau^-$ $\nu_\tau$	-1 0	$\tau^+$ $\bar{\nu}_\tau$

**Tabela 3** – Os Oitos Bárions com Spin Um Meio

Partícula	Símbolo	Carga	Partícula	Símbolo	Carga
Próton	p	+1	Sigma	$\Sigma^0$	0
Nêutron	n	0	Sigma	$\Sigma^-$	-1
Lâmbda	$\Lambda^0$	0	Xi	$\Xi^0$	0
Sigma	$\Sigma^+$	+1	Xi	$\Xi^-$	-1

**Tabela 4** – Os Noves Mésons com Spin Zero

Partícula	Símbolo	Carga	Antipartícula
Píon	$\pi^0$	0	$\pi^0$
Píon	$\pi^+$	+1	$\pi^-$
Káon	$K^+$	+1	$K^-$
Káon	$K^0$	0	$\bar{K}^0$
Eta	$\eta$	0	$\eta$
Eta	$\eta'$	0	$\eta'$

**Tabela 5** – Os Quarks

Partícula	Símbolo	Massa	Carga	Antipartícula
Up Down	u	10	+ 2/3	$\bar{u}$
	d	20	- 1/3	$\bar{d}$
Strange Charm	s	200	- 1/3	$\bar{s}$
	c	3 000	+ 2/3	$\bar{c}$
Bottom Top	b	9 000	- 1/3	$\bar{b}$
	t	60 000	+ 2/3	$\bar{t}$

Para uma leitura mais detalhada, sobre partículas elementares e forças de interação, recomendamos os trabalhos de Osterman [1] e [4].

## II. 15 – A Estrutura do Átomo da Mecânica Quântica

Com a descoberta das novas partículas, principalmente os quarks e o desenvolvimento da Mecânica Quântica (que não será abordado nesse trabalho), o seguinte modelo atômico foi proposto: O átomo é formado por uma região central, denominado núcleo; os prótons e nêutrons são formados pela aglutinação de quarks. Os prótons são formados pela união de dois *quarks up* e um *quark down*. Os nêutrons são formados quando dois *quarks down* e um *quark up* se unem. Envolvendo o núcleo temos a nuvem eletrônica. No mode-

lo atômico da mecânica quântica não falamos em órbita do elétron, como no modelo de Bohr, mas sim na probabilidade do elétron estar em tal órbita.

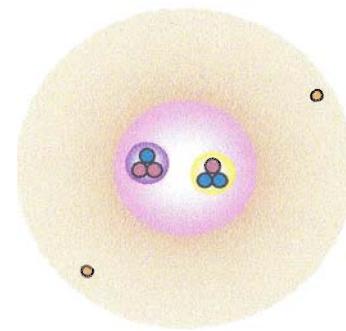


Figura 13 – Modelo atômico moderno. O círculo azul representa o próton. O amarelo o neutrônio. A esfera rosa representa a região central do átomo. A esfera laranja representa a região de maior probabilidade de se encontrar o elétron.

## Capítulo III

# A Formação da Moderna Ciência da Cosmologia

*Vi a Eternidade outra noite  
Como um grande anel de luz pura e sem fim,  
Toda calma, toda resplandecente,  
E em roda, abaixo dela, o Tempo em horas, dias e anos,  
Conduzido pelas esferas  
Movia-se como uma grande sombra; em que o mundo  
E todo o seu séquito eram arremessados\*.*

*Henry Vaughan, The World*

\* Tradução de Maria Luiza X. de A. Borges, para [19]

### **III. 1 – Introdução**

A Cosmologia é a ciência que estuda o universo. Ela lida com questões relacionadas com suas propriedades cósmicas tais como o espaço e o tempo; os seus constituintes na sua fase inicial e a expansão do universo. É, de fundamental importância para essa ciência, àqueles eventos que perduram por um período de tempo muito longo, e que estão presentes em grandes regiões do espaço [20, p.12]. A busca da compreensão desse universo, na sua totalidade, tem ocupado a mente humana ao longo dos séculos.

Na Cosmologia Greco-Romana, como já mencionamos, a Terra ocupava o centro do universo, (modelo geocêntrico). Depois, na Renascença o centro do universo era o Sol, com os demais astros orbitando em sua volta, (modelo heliocêntrico). Esse modelo foi proposto pela primeira por Aristarco de Samos, no século III a.C, mas só depois de quase 2000 anos e ele foi desenvolvido por Nicolau Copérnico, no século XVI.

Galileu Galilei foi, talvez, o primeiro a usar uma luneta para observar o céu, pelo menos assim diz a lenda. Observa que a Via Láctea, uma faixa esbranquiçada e extensa, que corta o céu de lado a lado, é, na verdade, constituída por uma infinidade de estrelas [19, p.58].

Em 1785, William Herschell assume que a Via Láctea é um disco achado estando o Sol localizado em seu centro. Em 1918, Harlow Shapley verificou que o centro da nossa galáxia estava muito distante do Sol, na direção da constelação do Sagitário [20, p.85].

### **III. 2 – Debate Curtis x Shapley**

Em 1920, os astrônomos Heber Curtis e Harlow Shapley iniciaram a fase final de um grande debate entre os astrônomos, que começou no século

XVIII, sobre a natureza de determinados objetos celestes, denominados nebulosas espirais (*apêndice 5*). Curtis defendia a tese de que esses objetos eram [...] “galáxias individuais ou universos ilhas, comparáveis em dimensão e número de componentes individuais a nossa própria galáxia”[21, p.1]”. Harlow Shapley argumentava que [...] “as espirais são simplesmente objetos nebulosos” [21, p.1], presentes na Via Láctea. A resposta definitiva para a questão foi dada por Edwin Hubble, que após uma série de observações de uma variável cefeída (*apêndice 6*) pertencente à nebulosa espiral Andrômeda, chega a conclusão que essa nebulosa se encontra a uma distância acima de 300 000 parsec (*apêndice 7*) da nossa; essa distância é muito superior ao raio da Via Láctea (cerca de 15.000 parsec), que já era conhecido naquela época. Diante desse resultado, a única conclusão plausível é que a nebulosa Andrômeda seja uma galáxia espiral, semelhante a nossa Via Láctea. Hoje, sabemos Andrômeda se encontra a uma distância aproximada de 2,9 milhões de anos luz da nossa [21, p.2].

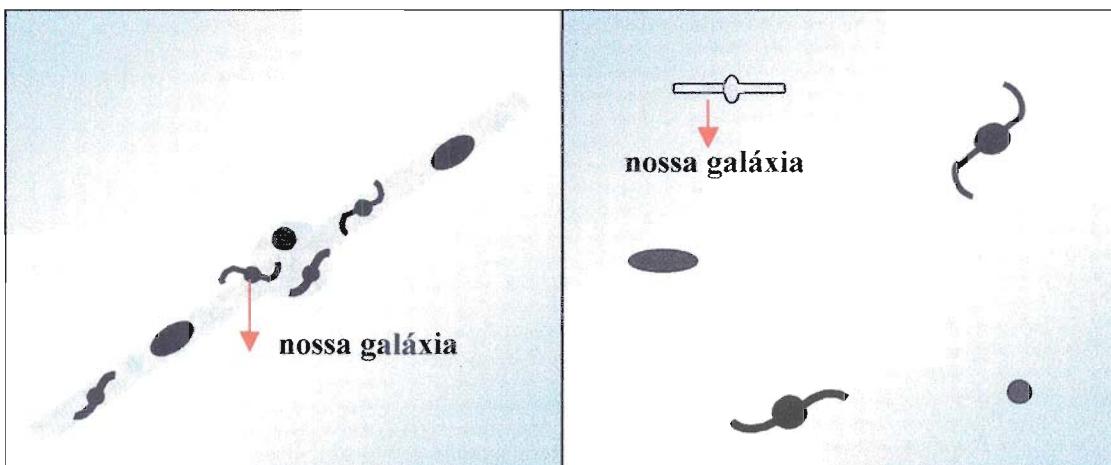


Figura 14 – Ilustração das hipóteses de Shapley (esquerda) e Curtis (direita), respectivamente, relativa a posição das nebulosas espirais em relação a Via Láctea.

### III. 3 – A Lei de Hubble

Informações sobre os objetos celestes (planetas, estrela, galáxias e outros), são obtidas basicamente através dos estudos dos espectros eletromagnéticos por eles emitidos (*apêndice 2*). Os cientistas podem estudar sua natureza, propriedades e movimentos, comparando seus espectros detectados por um equipamento denominado espetrógrafo, com os espectros padrões das substâncias ou elementos químicos, obtidos no laboratório. Em 1912, Vesto Melvin Slipher, estudando as linhas espectrais de Andrômeda, observou que elas sofriam um deslocamento em direção à região azul dos espectros padrões (fenômeno denominado *blueshift*). Pesquisando outras galáxias, notou que a grande maioria (36 nebulosas espirais das 41) apresentava um deslocamento de suas linhas espectrais para a região do vermelho (*redshift*). Esse resultado era estranho e surpreendente, pois se esperava, que na média, o número de nebulosas com *redshift* fossem iguais ao número de nebulosas com *blueshift*. Esse deslocamento das linhas espectrais pode ser interpretado, como devido ao efeito Doppler (*apêndice 8*), que se manifesta em virtude da mudança do comprimento de onda observado, sempre que um detector ou fonte move-se um em relação ao outro. Para a radiação eletromagnética, a equação do efeito Doppler é:

$$z = \frac{\lambda_{\text{observado}} - \lambda_{\text{emitido}}}{\lambda_{\text{emitido}}} = \frac{v_e}{c} \quad (\text{III.3.1})$$

onde,  $z$  é o desvio para o vermelho,  $v_e$  é a velocidade da fonte em relação ao observador e  $c$  é a velocidade da luz. Está-se supondo que a velocidade da fonte seja ao longo da linha de visada. Desvio para o vermelho positivo ( $z > 0$ ),

indica que a fonte se afasta do observador; desvio para o vermelho negativo ( $z<0$ ), indica que a fonte se aproxima do observador.

Para as nebulosas espirais observadas por Slipher foram obtidas velocidades que variavam entre 200 e 1100 km/s. Essa pesquisa foi a primeira evidência, baseada em dados observacionais, da expansão do universo.

Em 1929, Hubble, utilizando uma listagem de distâncias de galáxias obtidas por ele, juntamente com os dados de velocidades radiais dessas mesmas galáxias determinadas por Milton Humanson, constrói um gráfico plotando velocidade x distância para esses objetos (figura 15) e obtém uma relação linear;

$$v = H \cdot d \quad (\text{III.3.2})$$

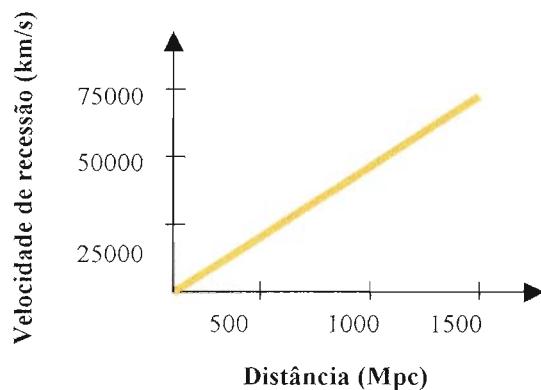


Figura 15. Lei de Hubble:  $v$  é a velocidade de recessão ou afastamento das galáxias,  $H$  é a constante de proporcionalidade, denominada constante de Hubble, e  $d$  é a distância das galáxias.

Essa relação é conhecida como Lei de Hubble; ela significa que quanto mais distante as galáxias estãoumas das outras, maior é a velocidade relativa de afastamento; isto é, as galáxias não somente estão se afastando uma das

outras, mas o fazem com velocidades cada vez maiores, confirmando os primeiros resultados obtidos por Slipher e estabelecendo, decisivamente, que o universo expande-se em todas as direções, como uma bola de ar que está sendo inflada ou uma massa de pão ou bolo crescendo num forno.

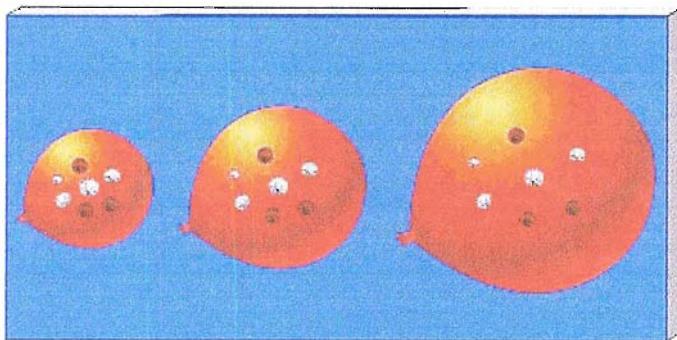


Figura 16 – Balão inflando ilustrando a expansão [22]

Uma forma bem lúdica, de transmitir, visualmente, a noção da expansão do universo e o significado da Lei de Hubble, para alunos do Ensino Médio, pode ser feita com um balão de borracha e moedinhos. O balão representa o universo e as moedinhos, as galáxias. Cola-se, ou prende-se com um adesivo, as moedinhos na bola vazia, e, em seguida, sopra-se a bola. A expansão da bola ilustra a expansão do universo e o aumento da distância entre as moedinhos ilustra a afastamento das galáxias.

### III. 4 – Modelos de Universo

#### 1 – Universo Estático

Esse modelo foi proposto por Albert Einstein, em 1917. Nesse tipo de universo não há expansão, nem contração e também não há modificação de suas propriedades (densidade, volume, etc) com o tempo. Ou seja, a aparência do universo, permanece inalterada, por toda sua existência.

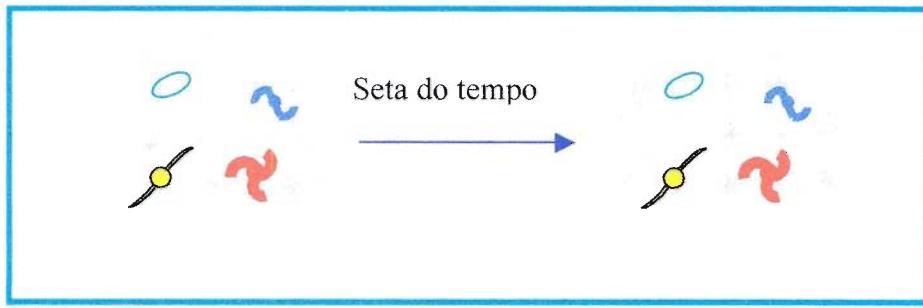


Figura 17. O Universo Estático de Einstein não evolui com o tempo.

## 2 – Universo Expansionista

Em 1922, Aleksandr Friedmann propôs um modelo de universo que tem origem num passado remoto e desde então, expande. Portanto, no modelo de Friedmann, o universo, passa por um momento de criação, chamado Big-Bang e evolui no tempo. Esse modelo é considerado o Modelo Padrão da Cosmologia [23].

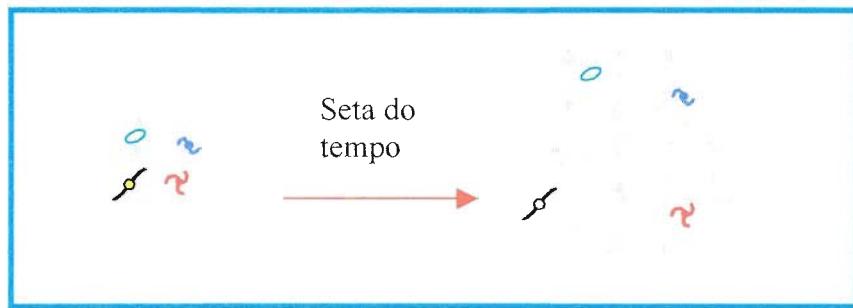


Figura 18. O universo com expansão tem uma origem e evolui espacialmente.

## 3 – Universo em Estado Estacionário

Este modelo de universo foi proposto em 1948, pelos astrônomos Thomas Gold, Hermann Bondi e Fred Hoyle, numa tentativa de obter um universo que se expande com o tempo, mas que não inclui o Big-Bang. Nesse modelo,

o universo não teve um início e não terá um fim (é eterno); conforme a expansão vai ocorrendo, matéria vai sendo criada, de tal forma que as propriedades médias do universo permanecem invariáveis no tempo [24, p.67].

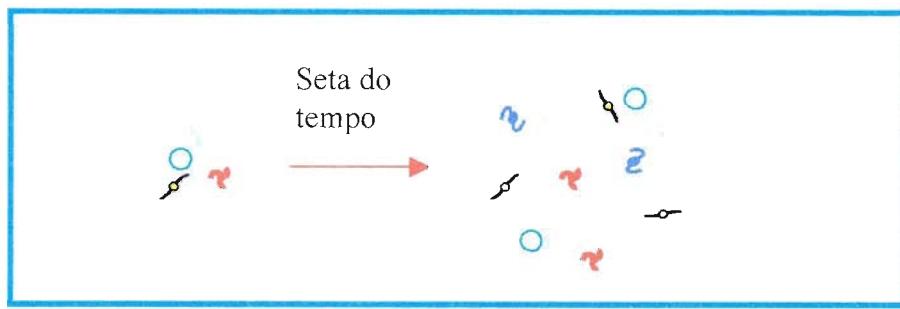


Figura 19. O universo em estado estacionário expande e ocorre criação de matéria

### III. 5 – Teoria do Big-Bang

#### III. 5.1 – Origem do Universo

A teoria do Big-Bang, a mais aceita por cosmólogos, atualmente, não foi formulada por uma única mente, mas resultou de um conjunto de pesquisas e descobertas, em vários ramos da Física, da Astronomia, assim como de avanços tecnológicos que possibilitaram o refinamento e a checagem entre os dados observacionais e aqueles preditos pela teoria.

Depois de confirmada a expansão do universo, os cientistas começaram a questionar: Como e quando o universo surgiu? O que ocasionou essa expansão? Se o nosso universo está em expansão, então é natural supor que se voltássemos atrás no tempo, ele iria se contraindo até o momento em que “todas as coisas”, dentro de uma determinada região nele contida, ficassem infinitamente comprimidas, densa e quente, denominada singularidade. Quase nada se sabe sobre essa fase do universo e muito menos se sabe o que havia

antes dela, pois as leis físicas que conhecemos não se aplicam a tal situação e não temos conhecimento das leis físicas que seriam aplicáveis a essas condições iniciais.

Segundo pressupostos da teoria, antes do Big-Bang não poderia existir matéria, energia, radiação, partículas, o próprio espaço e o tempo. Por razões ainda desconhecidas, deu-se o Big Bang, ou seja, espaço e tempo são criados. Esse universo infinitamente quente e denso começa a expandir e passa, então, a seguir uma trajetória evolutiva, cujos principais eventos ocorridos após  $10^{-43}$  s da criação podem ser descritos pela Física que conhecemos. A medida que o universo expande, sua densidade e temperatura decrescem.

### **III. 5.2 – Evolução do Universo**

A evolução do universo é dividida em duas grandes eras, denominadas Era da Radiação (onde radiação predomina sobre matéria) e Era da Matéria (onde a situação é inversa).

#### **III.5. 2.a – Era da Radiação**

Nessa era, o universo estava muito quente e a radiação domina a dinâmica da sua evolução. Ela se inicia com o Big-Bang e dura cerca de 1000 anos. Do instante inicial, até cerca de  $10^{-43}$  s (chamado tempo de Planck), nada é conhecido; quando o universo atinge a idade de  $10^{-43}$  s sua temperatura é da ordem de  $10^{32}$  K e sua densidade de  $10^{92}$  g/cm<sup>3</sup>. A era da radiação é subdividida em: Era do Quark, Era Hadrônica, Era Leptônica e Era Nuclear.

Na era dos Quarks, devido aos imensos valores da densidade e da temperatura, o universo era um mar de partículas realmente fundamentais (não

formada pelo agrupamento de outras partículas), como os quarks, léptons e neutrinos, que eram continuamente formadas e destruídas.

A era Hadrônica, compreende um intervalo de tempo que vai de  $10^{-35}$  s até  $10^{-4}$  s. A densidade e da temperatura existentes favorecem a criação de hadrons e o universo se torna um mar de hadrons (prótons, nêutrons, pions, etc. e suas antipartículas). Os léptons, também, estão presentes, porém a predominância é dos hadrons. Há ainda, em todas as partes, densos aglomerados de fôtons, léptons e suas respectivas antipartículas. No fim dessa era, a temperatura cai para cerca de  $10^{12}$  K. As partículas e suas antipartículas aniquilam-se e toda matéria e antimateria são praticamente varridas do universo, deixando um leve excesso de matéria, que, mais tarde, veio a dar origem às galáxias, estrelas e outros corpos celestes.

A era Leptônica inicia-se quando o universo tem  $10^{-4}$  s de existência e dura até  $10^2$  s. A temperatura do universo cai de  $10^{12}$  K para  $10^9$  K e sua densidade se reduz de  $10^{13}$  g/cm<sup>3</sup> para  $10^1$  g/cm<sup>3</sup>. Sob essas condições, a produção de pares elétrons-antielétrons é favorecida. Elétrons, neutrinos, fôtons e suas antipartículas (partículas leves) tornaram-se predominantes, ocorrendo também uma grande troca de energia entre elas. Edward Harrison descreve em [20, p.352].

[...] Mergulhado nesse fervente mar de fôtons e léptons estão, em menor quantidade, os núcleons – prótons e os nêutrons – e para cada núcleo existem aproximadamente um bilhão de fôtons, um bilhão de elétrons e um bilhão de neutrinos. Cada núcleon colide continuamente com os léptons, quando ele é um nêutron ele captura um pósitron e se torna um próton, e quando ele é um próton ele captura um elétron e se torna um nêutron. Em qualquer instante, aproximadamente metade dos núcleons são nêutrons e a outra metade são prótons.

Um evento muito importante que ocorreu no final desse período foi que os neutrinos deixaram de interagir entre si e com a matéria e puderam fluir livremente pelo universo.

A era Nuclear estende-se de  $10^2$ s a  $10^3$ s. A densidade decai de  $10^1\text{g/cm}^3$  para  $10^{-1}\text{g/cm}^3$  e a temperatura decresce de  $10^9\text{K}$  até  $3 \times 10^8\text{K}$ . O acontecimento marcante dessa era é a fusão de prótons e nêutrons, formando D<sup>2</sup> (Deutério; um isótopo do Hidrogênio) e originando núcleos de Hélio (He<sup>2</sup>), ou seja, ocorre a núcleossíntese dos elementos leves. O universo nesse período foi como uma bomba de Hidrogênio, e a energia liberada nesse processo de fusão foi imensa [24, p.74].

Na década de 40, George Gamow e seus assistentes se dedicaram à formulação de uma teoria, que pudesse explicar a criação dos elementos leves a partir do Big-Bang. Queriam saber se, no estágio bem inicial do universo primitivo, pudesse ter havido uma fase de formação de elementos leves, pois, já era sabido, que o processo de fusão de elementos leves a partir dos núcleos estelares não é suficiente para explicar a quantidade de hidrogênio no momento existente no universo. Gamow denominou esta fase, **núcleossíntese** [24, p. 74].

### III.5.2.b – Era da Matéria

Como podemos perceber, expansão do universo provoca um decréscimo na temperatura e na densidade do universo. Após algum tempo, surgem condições que levaram a predominância da matéria sobre a radiação, que, então, passa a comandar a dinâmica da evolução.

A era da Matéria compreende um intervalo que vai de 1000 anos até 10 bilhões de anos após a explosão inicial. Ao longo desse período, o universo passa pela Era Atômica, pela Era Galática e pela Era Estelar.

Na era Atômica, a densidade do universo varia entre  $10^{-13}\text{g/cm}^3$  e  $10^{-16}\text{g/cm}^3$  e sua temperatura descrece de 60.000K a menos de 3000K. Nela, fôtons, elétrons, prótons e alguns núcleos leves são as partículas constituintes do universo. Os fôtons colidem, intensamente, com os elétrons impedindo,

que ele se unissem aos prótons para formar o átomo de Hidrogênio. Quando a temperatura do universo cai para cerca de 3000K, a energia dos fótons não é mais suficiente para impedir a formação dos átomos de elementos leves e, assim, os fótons que não interagiam mais com a matéria, seguiram livres, constituindo a radiação cósmica de fundo. A matéria começou a dominar.

Ralph Alpher e Robert Hermann, assistentes de Gamow nos anos 40, propuseram que, se o universo na sua fase inicial foi muito quente e, se ele, realmente, surgiu a partir de um evento criador, então, deveria ter sido preenchido com uma intensa radiação nos instantes iniciais após a criação. [24,p.74] “[...] Essa radiação seria semelhante à bola de fogo que se forma, quando uma bomba de Hidrogênio explode. Essa bola de fogo iria se tornando menos brilhante, conforme, o universo fosse se expandido e resfriando, mas nunca desapareceria inteiramente”. A existência dessa radiação foi confirmada em 1965, pelos astrofísicos Arno Penzias e Robert Wilson, radioastrônomos do AT & T Bell Laboratories. Essa radiação denominada Radiação Cósmica de Fundo, que permeia todo o universo, encontra-se, atualmente, a uma temperatura de aproximadamente 3K e é um remanescente do universo primitivo.

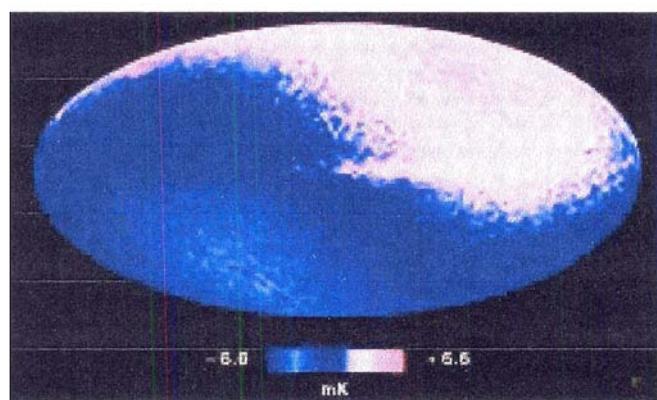


Figura 20 . Mapa do céu em microondas mostrando a radiação cósmica de fundo [22].

A era Galática abrange um intervalo de tempo que vai de 1 milhão a 1 bilhão de anos. Nessa época, a densidade caiu de  $10^{-16}\text{g/cm}^3$  a  $10^{-28}\text{g/cm}^3$  e a temperatura decresceu para 10K. Com 10 milhões de anos, a temperatura do universo era próxima a 300K. No final da era Galática, as galáxias tomaram suas formas atuais e moviam-se muito próximas uma das outras; incontáveis estrelas nasciam e morriam em seu interior. Com o surgimento das galáxias, formaram-se os aglomerados de galáxias, os superaglomerados de galáxias e as muralhas de galáxias, compondo a estrutura em grande escala do universo.

A era Estelar vai de 1 bilhão de anos até a época atual. A densidade caiu de  $10^{-28}\text{g/cm}^3$  à  $10^{-29}\text{g/cm}^3$  e a temperatura, de 10K para 3K. Quando o universo tinha 5 bilhões de anos, nasceu o nosso sistema solar e todas as galáxias já eram formadas, porém as estrelas continuam se formando até hoje.

A teoria do Big-Bang é, hoje, a teoria cosmológica dominante, pois explica:

- a expansão do universo;
- a radiação cósmica de fundo;
- a origem dos elementos leves, sendo também uma chave para entender a formação das galáxias e a estrutura em grande escala do universo.

## Infográfico sobre a origem e a evolução do universo



Fonte: Almanaque Abril Cultural, 1998 (CD).

## **Conclusão**

Quantas vezes os professores, já depararam com os seguintes questionamentos por parte de seus alunos: Por que tenho que aprender “isso”? Por que tenho que estudar essa matéria, se ela não é importante para a carreira que pretendo seguir?

Essas perguntas evidenciam que nas últimas décadas do século XX, o pragmatismo invadiu a forma de pensar dos alunos, tornando-se, atualmente, um grande desafio, para os professores resgatar o interesse por parte dos alunos, pelo conhecimento científico e pela busca do saber, independente da relevância que esses conhecimentos tenham na sua vida futura.

Acredito que a abordagem de temas que mostram a evolução da ciência ao longo dos séculos e principalmente o desenvolvimento científico alcançado no século XX, possa atuar como fator motivante para tal finalidade.

Espero, que o texto sobre Cosmologia escrito nesse trabalho, segundo uma visão histórica e os *slides* no *software power point*, possa de alguma forma auxiliar os estudantes do curso de Licenciatura em Física e professores do Ensino Médio, na abordagem desse tema em disciplinas extracurriculares, inseridas em alguns colégios para a divulgação da ciência contemporânea.

# **Apêndice**

## Apêndice 1–Método de Thomson para a determinação da velocidade e da razão massa/carga dos raios catódicos na Ampola de Crookes [8, p.173].

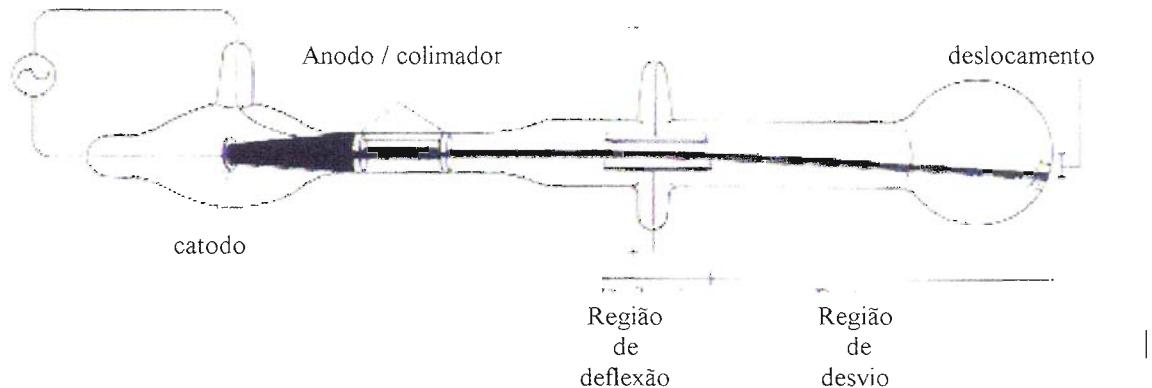


Figura 1.1–Aparato experimental de Thomson para determinar a razão massa/carga.

### 1- Raios catódicos sobre a ação de um campo elétrico E.

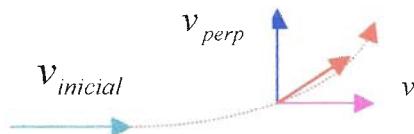
Pela 2<sup>a</sup> lei de Newton, a aceleração sobre os portadores de carga negativa é:

$$a = \frac{F}{m} \quad (1.1)$$

#### Na região de deflexão do raio

A componente da velocidade perpendicular (seta azul) à direção inicial do raio é dada por:

$$v_{perp} = a \cdot t = \frac{F}{m} \cdot t \quad (1.2)$$



Sendo o comprimento da região de deflexão  $l$ , e  $v$  a componente da velocidade na direção paralela (seta rosa) à direção original do raio, o tempo será determinado por:

$$t = \frac{l}{v} \quad (1.3)$$

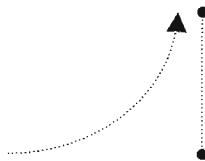
Substituindo (2) em (1), encontramos a expressão para a componente da velocidade perpendicular:

$$v_{perp} = \frac{F}{m} \frac{l}{v} \quad (1.4)$$

Após sair da região de interação:

Sendo o comprimento da região de desvio  $L$ , e  $v$  a componente da velocidade na direção paralela (seta rosa) a direção original do raio, o tempo será determinado por:

$$T = \frac{L}{v} \quad (1.5)$$



Na direção perpendicular à trajetória inicial, a distância  $d$  percorrida é dada por:

$$d = v_{perp} \cdot T \quad (1.6)$$

Substituindo as equações (1.4) e (1.5) na equação (1.6), encontraremos:

$$d = \frac{F}{m} \frac{l}{v} \frac{L}{v} \quad \therefore \quad d = \frac{F l L}{m v^2} \quad (1.7)$$

A força que atua sobre os portadores de carga negativa é a força elétrica, cujo módulo é dado por:

$$F_{eletr} = e \cdot E \quad (1.8)$$

Substituindo o valor de  $F$ , na equação (1.7) obtemos a equação do deslocamento do raio no final do tubo devido à força elétrica. Este deslocamento é chamado de deflexão elétrica  $d_{eletr}$ .

$$d_{eletr} = \frac{e E l L}{m v^2} \quad (1.9)$$

## 2- Raios catódicos sob a ação de um campo magnético B.

Sob a ação de um campo magnético, os portadores de carga ficam sujeitos a uma força magnética, cujo módulo é dado por:

$$F_{mag} = e \cdot v \cdot B \quad (1.10)$$

Assim, no cálculo anterior substituindo (1.10) em vez de (1.8), no final do tubo o desvio magnético  $d_{mag}$ , devido à força magnética é dado por:

$$d_{mag} = \frac{e B l L}{m v^2} \quad (1.11)$$

Dividindo a equação (10) pela (9), encontramos:

$$\frac{d_{mag}}{d_{eletr}} = \frac{B v}{E} \quad (1.12)$$

Resolvendo (11) para a velocidade, teremos:

$$v = \frac{E}{B} \frac{d_{mag}}{d_{eletr}} \quad (1.13)$$

As intensidades dos campos elétrico e magnético são conhecidas;  $d_{mag}$  e  $d_{eletr}$  são medidos para dados valores de  $E, B, L$  e  $l$ .

Para encontrar a fórmula que permite deduzir a razão massa/carga das partículas dos raios catódicos a partir das medidas de sua deflexão, devemos substituir a equação (12) na equação (10) e resolver para m/e.

$$\frac{m}{e} = \frac{B^2 l L d_{eletr}}{E (d_{mag})^2} \quad (1.14)$$

## Apêndice 2 – O espectro eletromagnético

Radiações são ondas eletromagnéticas que, além de se propagaram num meio, se propagam no vácuo com uma velocidade de 300.000km/s. Pode significar também uma corrente de partículas atômicas de alta energia cinética.

As ondas eletromagnéticas são formadas por campos elétrico e magnético, que além de oscilarem perpendicularmente entre si são perpendiculares à direção de propagação.

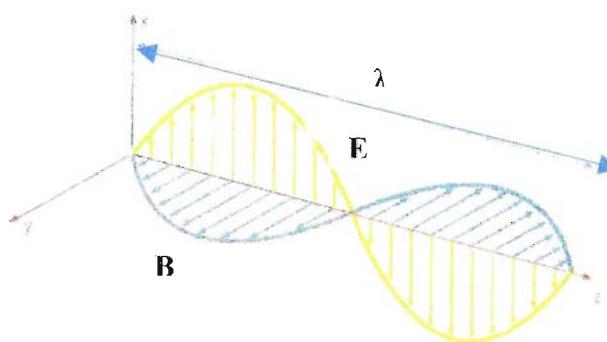


Figura 2.1 – Esquema de uma onda eletromagnética.  $\lambda$  é o comprimento de onda da onda, **E** é o campo elétrico (setas amarelas) e **B** o campo magnético (setas azuis) [25, p. 382].

A luz, o raio-X, o raio gama ( $\gamma$ ), as microondas, são radiações que se diferenciam por apresentarem diferentes freqüências de vibração, sendo porém, todas elas geradas por cargas elétricas aceleradas. Depois de geradas elas passam a ter uma existência independente da fonte que as produziram e se propagam transportando energia e momento. Apesar de possuírem a mesma origem, esses vários tipos de radiações, são responsáveis por fenômenos que apresentam propriedades distintas. A radiação infravermelha é emitida por corpos quentes e possui a propriedade de aquecer outros objetos quando são absorvidas por eles, enquanto a radiação luminosa (luz), que é detectada pelos nossos olhos, nos permite observar o mundo.

Denomina-se espectro eletromagnético, ao conjunto de todas as ondas eletromagnéticas existentes (fig.3), ordenadas segundo ordem crescente de freqüência ou decrescente de comprimento de onda, ou vice versa. Hoje sabemos que os raios-X são ondas eletromagnéticas (*apêndice I*) de alta freqüência, produzidos num tubo de vácuo, quando elétrons em alta velocidade colidem com um alvo metálico.

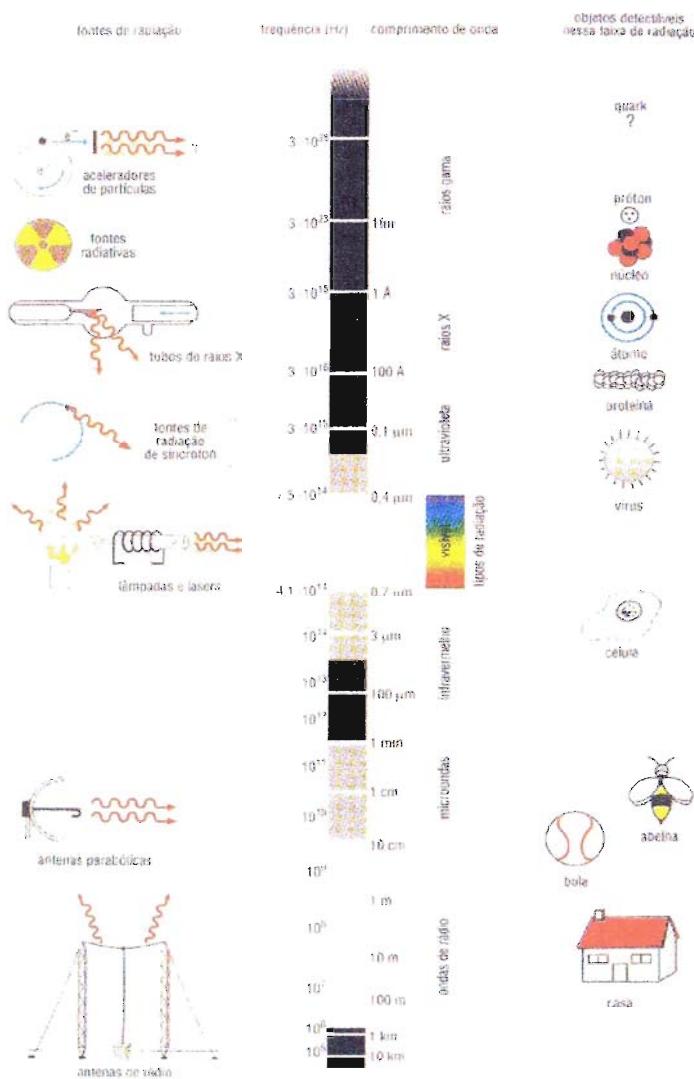
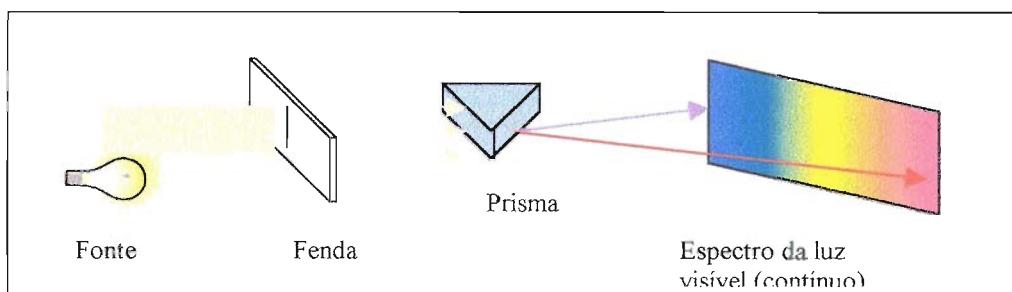


Figura 2.2. Espectro eletromagnético [25, p. 386].

## 2.1 – Tipos de espectros

### 2.1.a – Espectro da Luz ou espectro contínuo

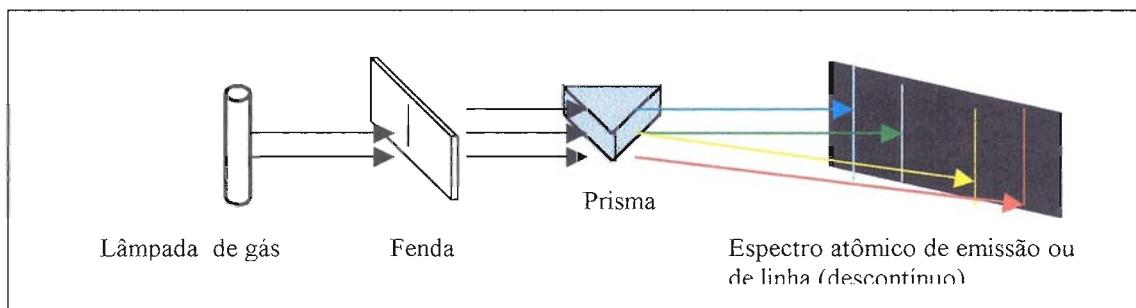
É conhecido popularmente como arco-íris. Surge quando a luz emitida por uma fonte luminosa (corpo incandescente) ou um gás quente e denso atravessa uma fenda e incide sobre um prisma. A imagem formada num anteparo evidencia que o prisma decompõe a luz numa sucessão de cores, sem interrupções, que vai do vermelho ao violeta, sendo, por isso, também chamado espectro contínuo (figura abaixo). A luz solar e demais estrelas, a lâmpada incandescente, apresentam esse tipo de espectro.



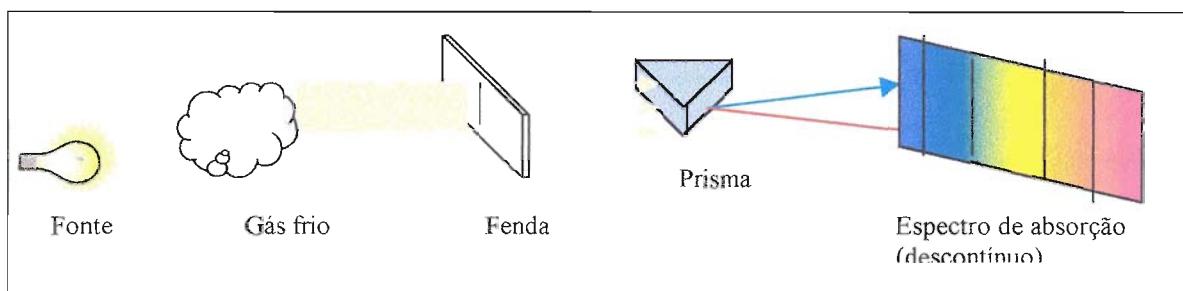
### 2.1.b – espectro atômico ou espectro de linha

Caracteriza-se por apresentar linhas coloridas ou pretas, em vez de uma sucessão contínua de cores. Existem dois tipos de espectros atômicos, a saber:

**1 - espectro atômico de emissão:** Esse tipo de espectro surge quando a luz de um gás quente de baixa densidade, após atravessar uma fenda, incide sobre um prisma, ocasionando a decomposição dessa luz em linhas coloridas, chamadas linhas espectrais de emissão sobre um fundo escuro (figura abaixo).



**2 - espectro atômico de absorção:** Quando a luz de uma fonte luminescente atravessa um gás mais frio, antes de passar pela fenda e atingir o prisma, aparece o espectro de absorção. Nesse tipo de espectro, surgem linhas escuras chamadas linhas escuras de absorção ou raias sobre um espectro contínuo (figura abaixo).



Todo elemento químico submetido a altas temperaturas emite radiações. Verificou-se que essa radiação produz um espectro atômico, onde cada linha espectral corresponde a um determinado comprimento de onda. Observou-se, também, que cada elemento químico apresenta um espectro atômico característico (figura 2.3). Assim, o espectro de linha é como uma impressão digital do elemento químico.

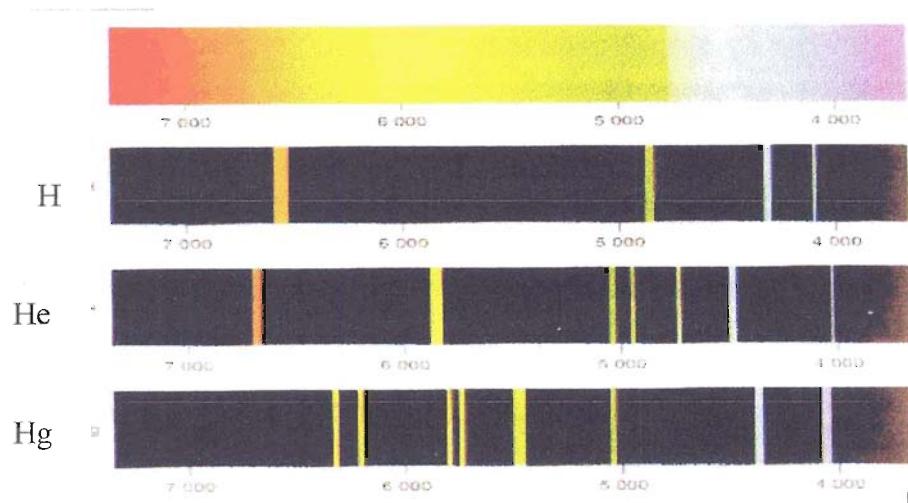


Figura 2.3 – Espectro atômico dos elementos H, He Hg [9, p.104]

### 2.1.c – O Espectro atômico de Hidrogênio

Em 1885, J. J. Balmer descobriu uma expressão que lhe permitia calcular a freqüência (comprimento de onda) das linhas do espectro de Hidrogênio, ( segundo espectro da figura ??) atualmente, denominada “série de Balmer”.

$$v = R \left( \frac{1}{4} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (2.1.c.1)$$

onde, R é uma constante e n são números inteiros que assume os valores 3, 4, 5, etc.

Bohr, em 1913, toma conhecimento da fórmula de Balmer, através de um amigo. Percebe, que multiplicando os dois membros da expressão por h, obtém uma fórmula que descreve o espectro do hidrogênio, por meio da quantização da energia, uma vez que a 1º membro da expressão, é a equação de Planck [15, p.262 e 16, ps. 99,100].

$$vh = hR \left( \frac{1}{4} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (2.1.c.2)$$

Tomando como base esses resultados, Bohr desenvolve uma série de postulados, que lhe permitiu descrever um modelo atômico, denominado Modelo Atômico de Bohr (II.2 desse trabalho).

## Apêndice 3 – O que é radioatividade.

**Radioatividade** – são emissões proveniente de transformação nuclear incontrolável, espontânea, que ocorre em certos átomos pesados, tais como Urânio, Plutônio, Tório e Rádio. Tais emissões podem ser partículas e radiações e são (fig.?):

**1 - Partícula Alfa ( $\alpha$ )** – Descoberta em 1897-98 por Ernest Rutherford. É um núcleo do átomo de hélio ionizado ( ${}_{\text{He}}^{2+}$ ) e, portanto, constituído de 2 prótons e 2 nêutrons. Possuem pouco poder de penetração, podendo ser paradas até por uma simples folha de papel. Quando um núcleo radioativo emite uma partícula alfa, diz-se que ele sofreu um decaimento alfa.

**2 - Partícula Beta ( $\beta$ )** – Descobertos por Ernest Rutherford, na mesma época. É um elétron com grande energia cinética. Possui maior poder de penetração que as partículas alfas e viaja milhares de quilômetros por segundo. Quando uma partícula beta é emitida pelo núcleo, diz-se que houve um decaimento beta.

**3 - Raio Gama ( $\gamma$ )** – É uma onda eletromagnética de alta freqüência. Por ser, somente, uma onda e não ter massa possui grande poder de penetração, chegando a atravessar uma folha de chumbo de 1cm de espessura. Os raios gamas também são emitidos pelos núcleos nas reações nucleares e produzidos nos aceleradores de partículas.

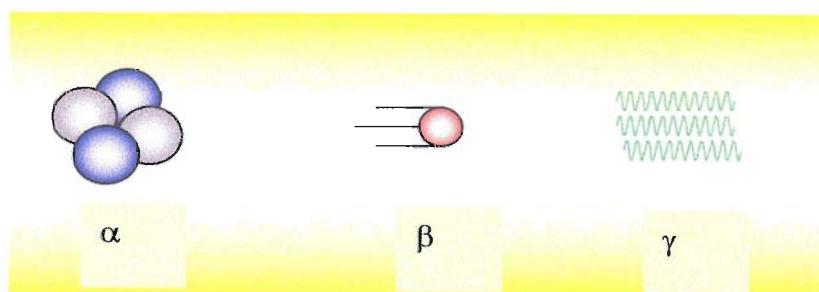
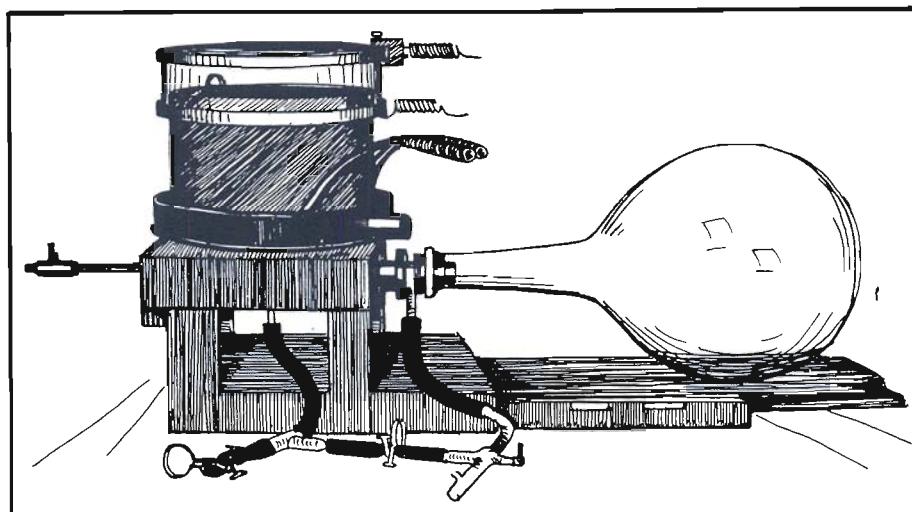


Fig.3.1 – partícula alfa (bola azul representa o próton e bola cinza o nêutron), beta e raio gama respectivamente.

#### Apêndice 4 – Câmara de Wilson

Essa câmara consiste em um cilindro cheio com ar rarefeito, ligado a um recipiente esférico de vidro; abrindo a válvula, o ar no cilindro expande para o recipiente esférico; o ar expandido esfria e o vapor de água nele contido se condensa sobre os íons produzidos pelo raio cósmico, provocando uma neblina. O problema, é que a expansão tem de acontecer no momento em que passa o raio. Uma melhora do aparelho foi colocá-lo entre dois contadores Geiger; o acionamento dos contadores pelo raio cósmico, por sua vez aciona-va a câmara.



## Apêndice 5 – Nebulosas Espirais

Quando os astrônomos apontavam seus telescópios para o céu, além de milhares de estrelas, planetas, e outros objetos celestes, observavam, também, a presença de objetos que pareciam pequenas nuvens, que denominaram nebulosas.

Com a construção de telescópios mais potentes e a análise dos espectros obtidos, a natureza de vários desses objetos começaram a ser desvendados. Foi verificado que muitos são, realmente, grandes massas gasosas, cujas dimensões chegam a milhares de anos-luz. Porém havia um grupo de nebulosas, cuja aparência é de uma pequena nuvem branca, difusa, semelhante a um disco. Entre esses, está a nebulosa de Andrômeda, que pode ser vista a olho nu, em noites com o céu bem limpo e escuro.

Durante a década de 20, utilizando, o potente telescópio do Observatório de Monte Wilson, Hubble obteve uma série de fotografias que resolviam a nebulosa de Andrômeda, em grande parte, em milhares de pequeninas estrelas. Entre essas, Hubble identificou uma variável Cefeída. Assim, utilizando a relação de Henrietta Leavitt, Hubble pode determinar a distância de Andrômeda. Encontrou que ela se encontra a 300 000 parsec.

Com esse trabalho de Hubble ficou comprovado que, as nebulosas espirais na realidade são galáxias, semelhantes a nossa e distantes milhões de anos-luz [26, ps.515,516].



Figura 5.1 - Imagem da galáxia M51. Esses objetos até o início do século eram denominados nebulosas espirais [22].

## Apêndice 6 – Variáveis Cefeídas

É o nome dado a um grupo de estrelas, que se caracteriza por uma variação intrínseca em seu brilho, que se repete com regularidade. Ou seja, essas estrelas incham e contraem (variam o seu volume, brilho, raio, cor, etc.), num intervalo de tempo, (período), aproximadamente constante. O nome cefeída, para esse tipo de objeto, vem da estrela  $\delta$  (delta) da constelação do Cefeu que pertence a essa classe [26, p.416].



Figura 6.1 . Desenho ilustrando a variação de tamanho e brilho de uma variável cefeída

Em 1912, Henrietta Leavitt, estabeleceu uma relação entre o período e a luminosidade desses objetos, observando um grande número dessas estrelas, nas nuvens de Magalhães (duas galáxias satélites da nossa) [27, p.83]. Quanto maior o período maior a luminosidade. As cefeídas se dividem em dois grupos:

**Cefeídas de conglomerados** ou cefeídas de curto período – são cefeídas que apresentam variação de brilho, num período inferior a 0,8 dias.

**Cefeídas clássicas** ou cefeídas de longo período – nessas o período de variação do brilho, ocorre entre 3 e 45 dias.

A descoberta das variáveis cefeídas, em outras galáxias, foi de importância fundamental, tanto para a astronomia como para a cosmologia, pois por intermédio desses objetos, podem ser feitas estimativas das distâncias de galáxias, não muito distantes (astronomicamente falando, é claro) da nossa. A descoberta de uma variável cefeída na galáxia Andrômeda permitiu que Hubble determinasse sua distância.

## Apêndice 7 – Unidades de distância mais usadas em Astronomia e Cosmologia [27, ps, 41,42]

**1 - ano-luz (a.l)** - é definido como a distância percorrida pela luz, no intervalo de tempo de 1 ano, com velocidade constante igual a 300.000 km/s. Portanto em 1 segundo a luz percorre a distância de 300.000km. Para determinar essa distância em 1 ano, devemos transformar ano em s.

$$\begin{aligned}1 \text{ dia} &\equiv 86.400 \text{ s} \\1 \text{ ano} &= 365 \text{ dias} = 31.536.000 \text{ s}\end{aligned}$$

Como, distância = velocidade x tempo, substituindo os valores temos:

$$\begin{aligned}d &= 3 \times 10^5 \text{ km} \times 31.536.000 \text{ s} \\d &= 94068 \times 10^8 \text{ km} = 9,4608 \times 10^{12} \\d &= 9,5 \times 10^{12} \text{ km}\end{aligned}$$

$$\text{Logo: } 1\text{a.l} = 9,5 \times 10^{12} \text{ km}$$

**2 - Unidade Astronômica (U.a.)** - é definida como a distância média da Terra ao Sol. A Terra descreve uma elipse em torno do Sol, durante seu movimento anual, com o Sol ocupando um dos focos dessa elipse. A distância Terra-Sol não é constante. A menor distância corresponde ao ponto chamado periélio e vale aproximadamente 147.000.000 km e a maior corresponde ao ponto denominado afélio.

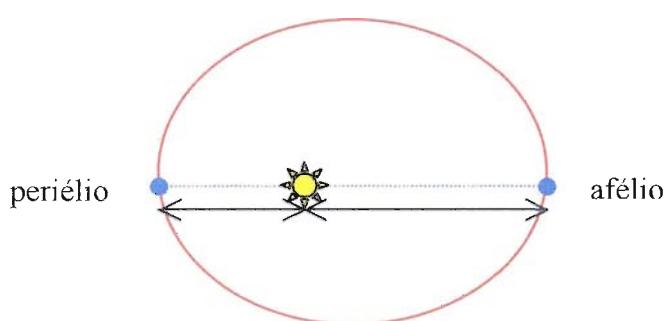


Figura 7.1 – A posição do Sol e pontos de afélio e periélio na órbita da Terra.

A distância média Terra-Sol será:

$$\bar{d} = \frac{147.000.000 \times 152.000.000}{2}$$
$$d = 149.500.000 \text{ km}$$

Então,

$$1 \text{ U.A.} = 149.500.000 \text{ km} = 1,495 \times 10^8 \text{ km}$$

$$1 \text{ U.A.} \approx 1,50 \times 10^8 \text{ km}$$

**3 - Parsec (pc)** - A palavra parsec é formada pela junção das três primeiras letras das palavras inglesas parallax (paralaxe) e second (segundo). Para definir paralaxe e parsec, consideremos o triângulo retângulo abaixo.

Sejam:

E – uma estrela

S – Sol

T – Terra

$\overline{ST}$  – base do triângulo, corresponde ao semidiâmetro da órbita da Terra, que mede 1 U.A.

$\overline{SE}$  – distância da estrela ao Sol

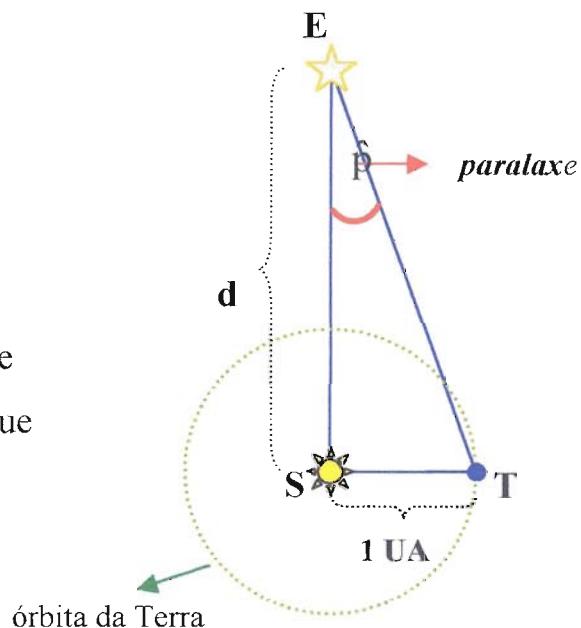


Figura 7.2 – O ângulo de paralaxe, determinado pelo triângulo SET.

**Paralaxe** - é definido como o ângulo  $\hat{p}$  que subtende a distância ST, quando visto da estrela. Quanto menor a distância da estrela ao sol, maior é o ângulo

$\hat{p}$  e quanto maior essa distância menor será esse ângulo. Quando a estrela está a uma distância  $d$  tal que o ângulo paralático vale  $1''$ , surge o parsec.

Assim:

Se  $\hat{p} = 1''$  e  $ST = 1$  U.A., então,  $d = 1$  parsec.

Relação entre parsec com unidade astronômica e parsec com ano-luz.

$$1 \text{ pc} \approx 2,062 \times 10^5 \text{ U.A.}$$

$$1 \text{ pc} \approx 3,26 \text{ a.l.}$$

## Apêndice 8 – Efeito Doppler

Chama-se efeito Doppler, ao fenômeno da aparente alteração na medida do comprimento de onda (ou freqüência) de uma onda emitida por uma fonte luminosa ou sonora, quando detectada por um observador ou um receptor, se existir movimento relativo entre eles. O que ocasiona o efeito Doppler é o movimento relativo entre a fonte e o receptor.

Observe as seguintes situações:

1<sup>a</sup>) Fonte e observador em repouso relativo:

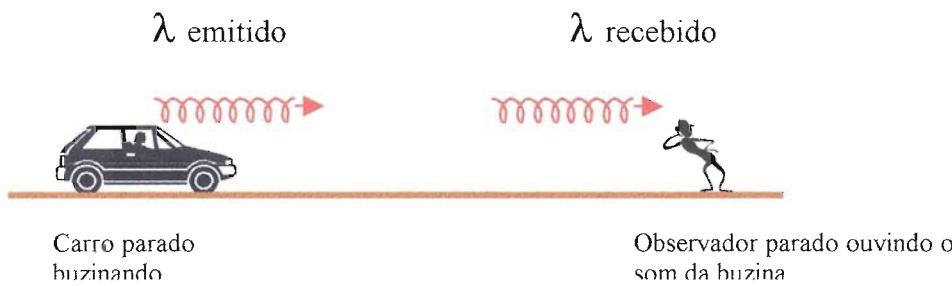


Figura 8.1 – Efeito Doppler para o observador e fonte em repouso.

Quando a fonte e o observador estão em repouso não ocorre o efeito Doppler.

Logo:

$$\lambda \text{ emitido} = \lambda \text{ recebido}$$

2<sup>a</sup>) Fonte em movimento e observador parado:

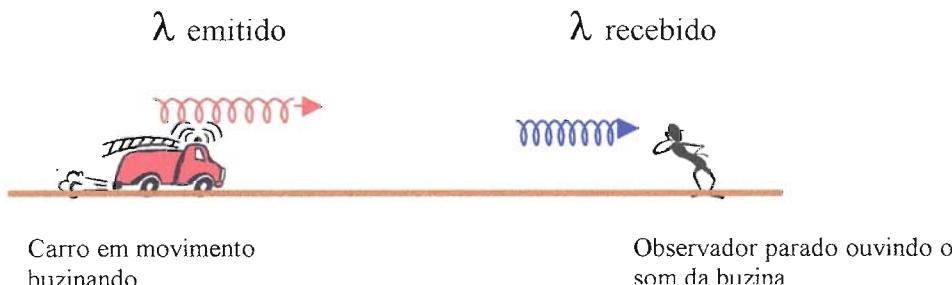
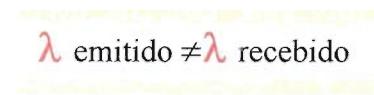


Figura 8.2 – Efeito Doppler para carro em movimento e observadore em repouso

Nesse caso, o comprimento de onda emitido pelo buzina (comprimento real) é diferente daquele recebido pelo observador (comprimento aparente). Entenda, que não ocorre uma mudança real no valor do comprimento de onda emitido. O receptor detecta, um comprimento de onda diferente, devido, unicamente, ao movimento da fonte.



3<sup>a</sup>) Fonte parada e observador em movimento:

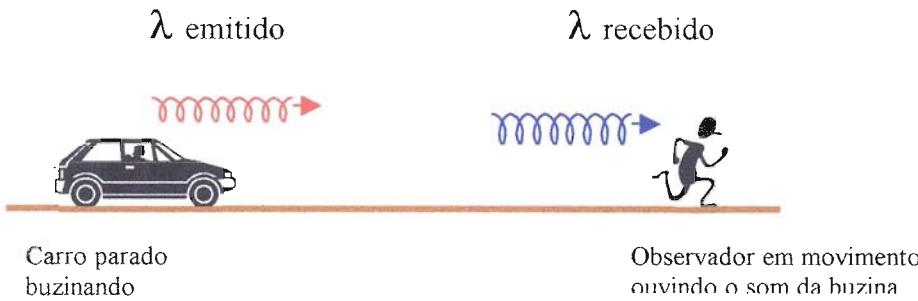


figura 8.3 – Efeito Doppler com carro em repouso e observador se afastando da fonte

Nesse caso, também ocorre uma aparente mudança no valor do comprimento de onda emitido pela fonte, quando essa onda é detectada pelo observador. Quando o movimento relativo entre a fonte e o observador é de aproximação, o comprimento de onda detectado é menor que o emitido. Quando há um afastamento entre fonte e receptor, o comprimento de onda detectado é maior. Equação do Efeito Doppler para ondas mecânicas:

$$v' = v \left( \frac{V_{\text{som}} \pm v_{\text{observador}}}{V_{\text{som}} \mp v_{\text{fonte}}} \right) \quad (7.1.1)$$

onde,  $v'$  é a freqüência detetada pelo receptor (aparente) e  $v$  é a emitida pela fonte.  $V$  é a velocidade de propagação da onda no meio ( ar, água, óleo, etc.).

Você pode perceber o Efeito Doppler, ficando parado numa calçada ou numa estrada e ouve a sirene de uma ambulância ou de um carro bombeiro,

em movimenta. Quando o carro se aproxima, você ouve o som cada vez mais agudo (comprimento de onda vai diminuindo, logo a freqüência vai aumentando); quando o carro se afasta o som vai se tornando cada vez mais grave (comprimento de onda aumenta, logo a freqüência diminui).

## 7. 1 – O Efeito Doppler nas Radiações Eletromagnéticas

O Efeito Doppler, também se manifesta nas ondas eletromagnéticas, inclusive, nas ondas eletromagnéticas da luz.

Em relação ao receptor, ocorre uma mudança aparente no comprimento de onda, da onda emitida pela fonte luminosa. As conclusões para este tipo de fonte são idênticas às da fonte sonora: uma diminuição do comprimento, quando o movimento relativo é de aproximação, e um aumento no comprimento, quando o movimento é de afastamento.

Nas fontes luminosas, o efeito se manifesta como uma mudança na cor da luz recebida. Quanto maior a velocidade relativa, maior é a percepção do efeito.

Quando a luz emitida pelas galáxias e outros objetos celestes, estão deslocadas para a região do infra-vermelho do espectro eletromagnético, indica que o objeto esta se afastando (*redshift*) da Terra, quando esta deslocada para a região ultra-violeta, indica aproximação (*blushift*).

## Referências

- [1] – **OSTERMAN**, Fernanda, “Um pôster para ensinar Física na escola”. *Física na Escola*, **2**, nº1, 2001, 13,18
- [2] – **MEC**, *Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio*, 1999.
- [3] – **COLL** Salvatore, César et alii, *Psicologia do Ensino*, capítulo 11, Atmed, 2000.
- [4] – **OSTERMAN**, Fernanda; “Um Texto para Professores do Ensino Médio sobre Partículas Elementares”, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, **21**, nº3, 1999, 415,435.
- [5] – **MOREIRA**, Marco A. *Uma Abordagem Cognitivista do Ensino de Física*. Editora da Universidade de Porto Alegre, 1983.
- [6] – **ROLLER**, Duane H. D., *Greek Atomic Theory*.
- [7] – **CLOSE**, Frank, **MARTEN** Michael, **SUTTON** Christine, *Particle Explosion*. Oxford University Press, 1987.
- [8] – **WEINBERG**, Steven, *The Discovery of Subatomic Particles*, Scientific American Books, 1983.
- [9] – **GALLO** Netto, Carmo, *Química, Da Teoria à Realidade*, **1**, Scipione, 1996.
- [10] – **FRISCH**, Otto e **WHEELER**, John; “Descoberta da Fissão”. *History of Physics*/ Editora, 1967. 272, 271
- [11] – **HAHN**, Otto e **STRASSEMAN**, Fritz., *Die Naturwessemenschaften*, **27**, 11, 1939.
- [12] – **MEITNER**, Lise e **FRISCH**, Otto R., *Nature* **143**, 239 (1939)
- [13] – **BOHR**, Niels e **WHEELER**, John A., *Physics Review*, **56**, 426 (1939)
- [14] – **ENGE**, Harald, *Introduction to Nuclear Physics*. Addison, Wesley, 1972.
- [15] – **GAMOW**, George, *Biografia da Física*. Zahar Editôres, 1963.
- [16] – **CLINE**, Bárbara L, *Man Who Made a New Physics*, Universidade de Chicago, 1987.
- [17] – **DIAS**, Penha M. D. “ Um Episódio Brasileiro na Física (anos 40): Os Pioneiros e a “Escola da Física” ” , *A Cultura da Física: Contribuições em Homenagem a Amélia Império Hamburger*, Livraria da Física, USP, 2001.
- [18] - – **HALLIDAY**, David e **RESNICK**, Robert., *Fundamentos da Física*, **4**, Livros Técnicos e Científicos Editora, 1992.
- [19] **HARRISON**, Edward, *A Escuridão da Noite*. Jorge Zahar Editor, 1995.

- [20]- **HARRISON**, Edward, *Cosmology, The Science of the Universe*. Cambridge University Press. 1981.
- [21]-**WAGA**, Ioav, “A Expansão do Universo”. *Cadernos Didáticos do IF/UFRJ*, 2000.
- [22] - **CHAISSON**, E. and **McMILLAN**, E., *Astronomy Today*, Printice Hall, 1999.
- [23] - **WEINBERG**, Steven, *Os Três Primeiros Minutos do Universo*; Editora Gradiva, 1987.
- [24] – **JASTROW**, Robert, *God and the Astronomers*. W.W.Norton & Company, 1992..
- [25] – **AMALDI**, Ugo, *Imagens da Física*. Scipione, 1995.
- [26] – **RUDAUX**, Lucien e **VAUCOULEURS**, Gérrard. *Astronomía*., Editora Labor S.A., 1966.
- [27] – **SWIHART**, Thomas L., *Astrophysics and Stellar Astronomy*. John Wiley & Sons, 1968.

